

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA de MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

CURSO 2015-2016, SEMESTRE DE OTOÑO

2005 TRABAJO DE FIN DE GRADO AULA nº 1

Análisis de la resistencia al fuego de una estructura:

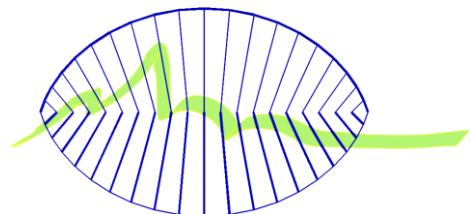
El Mercado de San Miguel

AUTOR: SERGIO LUQUE LÓPEZ

TUTOR: BELÉN ORTA RIAL



CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL



Análisis de la resistencia al fuego de una estructura: El Mercado de San Miguel

Serie: Trabajos de Fin de Grado en Fundamentos de la Arquitectura.
Series on: Diploma Projects on Fundamentals of Architecture.
Title: Análisis de la resistencia al fuego de una estructura: El Mercado de San Miguel.
Author: Sergio Luque López
Director: Prof. Dr. Arch. Belén Orta Rial
January 2016

Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
Departamento de Estructuras y Física de la Edificación
Avenida Juan de Herrera s/n 28040 Madrid.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

CURSO 2015-2016, SEMESTRE DE OTOÑO

2005 TRABAJO DE FIN DE GRADO AULA nº 1

Análisis de la resistencia al fuego de una estructura:

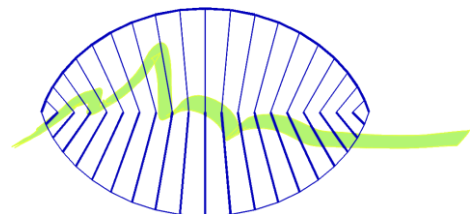
El Mercado de San Miguel

AUTOR: SERGIO LUQUE LÓPEZ

TUTOR: BELÉN ORTA RIAL



CAMPUS
DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL



Indice

1. Introducción	7
2. Búsqueda y elección del Edificio para tomar como caso de estudio	8
2.1. Descripción de los criterios escogidos para localizar el edificio como caso de estudio	8
2.2. Breve descripción de los distintos ejemplos encontrados en Madrid.....	8
3. Mercado de San Miguel	13
3.1.Descripción del edificio	14
3.2. Plantas, Secciones y Alzados	16
3.3. Clasificación del Edificio	19
4. Estudio del método del tiempo equivalente	22
4.1. Aplicación de la normativa actual	22
5. Variables de diseño	25
5.1. Sectorización	25
5.2. Ocupación.....	26
5.3. Instalaciones	26
5.4. Ventilación	28
5.5. Carga Combustible.....	32
5.6. Coeficiente de corrección según el material	36
6. Determinación del tiempo equivalente de exposición al fuego según la hipótesis desarrollada	37
6.1. Cálculo	37
6.2. Densidad de carga combustible de cálculo	37
6.3. Hipótesis.....	38
7. Análisis de los resultados.....	41
8. Elección de una hipótesis.....	41
9. Respuesta de la estructura al fuego	42
9.1. Estudio de las columnas de fundición	42
9.2. Características de las columnas de fundición del Mercado de San Miguel	45
9.3. Hipótesis habitual sin fuego	46
9.4. Hipótesis con fuego	47
10. Protección de la estructura mediante pintura intumescente	49
10.1. Descripción de la pintura intumescente	49

10.2. Aplicación de la pintura intumescente en el Mercado de San Miguel	50
11. Intervención en otros edificios similares	52
12. Medidas actuales en el Mercado de San Miguel.....	52
13. Conclusiones	54
14. Bibliografía	56

1. Introducción

A lo largo de la historia fueron muchos los edificios que se perdieron definitivamente por una gran variedad de causas: fenómenos naturales, movimientos sociales, accidentes, intereses económicos, etc. Sin embargo, el fuego ha sido una de las principales causas por la que en la actualidad no se conservan algunos edificios.

Existen muchos ejemplos de edificios que tuvieron que ser destruidos como consecuencia de incendios. A pesar de que existen numerosas medidas para evitar este tipo de accidentes, el fuego no deja de ser un proceso complejo y difícil de controlar. Es por ello que en la actualidad existen normativas para reducir al mínimo las posibilidades de que en un edificio se genere un incendio, o en su defecto, evitar que el incendio destruya el edificio.

Este tipo de medidas se aplican en edificios nuevos, pero aquellos edificios de construcción anterior a este tipo de normativas contra incendios, no se proyectaron teniendo en cuenta estos criterios. Por tanto, en aquellos edificios que han perdurado hasta la actualidad y que tienen un gran valor histórico, existe un riesgo muy alto de su pérdida en caso de incendio si no se toman las debidas precauciones.

Existe una tipología de edificios con mayor riesgo de pérdida en caso de incendio. Se trata de edificios de estructura de acero vista, donde la propia estructura tiene un valor estético dentro del propio edificio. Por tanto, a diferencia de otros edificios, éstos están muy limitados en cuanto a las posibles medidas a adoptar para protegerlos en caso de incendio.

En Madrid, muchos de estos edificios fueron construidos a lo largo del s. XIX. El objetivo de este trabajo es localizar un caso concreto de este tipo de edificios y estudiar el estado actual en relación a la protección de incendios y qué posibles medidas mejorarían dicho comportamiento.

Este tipo de edificios no están obligados a cumplir la normativa, pero en el caso fortuito de sufrir un incendio supondría una pérdida patrimonial importante. Por tanto, al mismo tiempo que se analiza un caso real, se pretende hacer una reflexión sobre la importancia de incorporar medidas que permitan preservar este tipo de edificios para las generaciones futuras.

Para determinar la resistencia al fuego de la estructura de un edificio histórico de Madrid, se utiliza la normativa actual (CTE 2006). Se estudiarán las diversas posibilidades que ofrece el código con el fin de que la solución propuesta implique el menor grado de intervención posible, permitiendo mantener las condiciones arquitectónicas originales del edificio.

Para ello, y como se estudiará a lo largo del trabajo, será necesario recurrir a la resistencia al fuego mediante el tiempo equivalente en el que influyen diversos factores (tamaño del edificio, materiales, ventilación, medidas activas en la lucha contra el fuego, etc.).

2. Búsqueda y elección del Edificio para tomar como caso de estudio

2.1. Descripción de los criterios escogidos para localizar el edificio como caso de estudio

Existen varios métodos según el Código Técnico de Edificación (CTE 2006) para analizar la resistencia a fuego de una estructura. En la mayoría de los casos, sobre todo para edificios actuales, se puede recurrir a métodos simplificados a partir de valores tabulados que relacionan estructura, uso y altura de evacuación del edificio. Sin embargo, para edificios más complejos, cuyas características limitan la actuación en el edificio, existen diversos métodos que consideran características particulares del sector estudiado (las medidas activas de lucha contra el fuego, la ventilación, el material estructural, el tamaño, etc.).

El objetivo de este trabajo es encontrar un edificio que cumpla los requisitos necesarios para poder analizar la resistencia a fuego mediante métodos que se salgan del método común.

Para ello, se trata de buscar un edificio cuyas características limiten la actuación en el mismo. De este modo, todos aquellos edificios cuya estructura sea metálica y vista, y además sea un edificio protegido, es bastante probable que se adecúe a los requisitos que se buscan en este trabajo.

2.2. Breve descripción de los distintos ejemplos encontrados en Madrid

Los edificios tomados como posibles casos de estudio se localizan en Madrid. De este modo, la recogida de datos en el mismo edificio será inmediato y se podrá realizar cuantas veces sean necesarias.

A continuación se muestran todos los edificios que se tomaron como casos posibles para realizar el estudio.

2.2.1. *Museo de Ciencias Naturales de Madrid*

El edificio se comenzó a construir en 1882, en los Altos del Hipódromo bajo la dirección del arquitecto Fernando de la Torre, auxiliado por Emilio Boix y Merino, quien a la muerte del primero continuó las obras en 1886.

El constructor era Federico Villalba, pero a los pocos meses solicitó la autorización para ceder los derechos a una empresa extranjera, la Sociedad Anónima Internacional de Construcción y Contratas Públicas de Braine le Comte, de Bélgica, lo que motivó que muchos materiales fueran importados de este país.

El edificio lo constituye una estructura de ladrillo y hierro, con columnas de fundición, pisos de viguetas metálicas y armaduras de cubierta de sistema Polonceau. Estaba ornamentado con motivos cerámicos, casi desaparecidos, al igual que las carpinterías de acero originales.

2.2.2. Palacio de Velázquez

El Palacio de Velázquez (1883) es, junto al Palacio de Cristal, una de las dos sedes expositivas del Museo Reina Sofía en el Parque del Retiro de Madrid. Toma su nombre del arquitecto Ricardo Velázquez Bosco, quien también colaboró en la construcción con el ceramista Daniel Zuloaga y el ingeniero Alberto del Palacio.

El edificio (Figura 1), cercano al historicismo neorrenacentista, es de planta amplia, cubierta con bóvedas de estructura de hierro y con iluminación natural, gracias a la superficie acristalada.



Figura 1. Vista interior del Palacio de Velázquez. Julio García. 2013. <http://www.metalocus.es>.

2.2.3. Mercado de San Miguel

El Mercado de San Miguel (Figura 2) es el único mercado en hierro que ha llegado hasta nuestros días, una vez desaparecidos los formidables ejemplos de La Cebada y Los Mostenses. Está considerado Bien de Interés Cultural en la categoría de Monumento. Situado en la plaza de San Miguel con fachadas a la Plaza del Conde de Miranda y a la Cava de San Miguel. Su construcción, bajo la dirección de Alfonso Dubé y Díez, se concluyó en 1916.

Instalado en su origen al aire libre, en 1835 se realiza un proyecto, por Joaquín Henri, para cubrirlo, del que sólo se ejecutan más que unas portadas, eliminando el mal efecto que a la plaza le producían los cajones dispares en los comerciantes. En 1911 se encarga el proyecto definitivo a Alfonso Dubé.

Consta de una planta baja con estructura metálica de soportes de hierro fundido y un sótano para almacenes.



Figura 2. Entrada del Mercado de San Miguel. Manuel Aguilar. 2011. www.3viajes.com

2.2.4. Palacio de Fomento

El Palacio de Fomento (Figura 3), sede del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente es un edificio que data del siglo XIX. Su autor es el arquitecto Ricardo Velázquez Bosco, quien siguió las cimentaciones proyectadas por Mariano Belmás y Estrada en 1881.

El perímetro interior del edificio principal se encuentra rodeado por amplias galerías y enmarca tres grandes espacios centrales: los dos lucernarios y la escalera imperial.

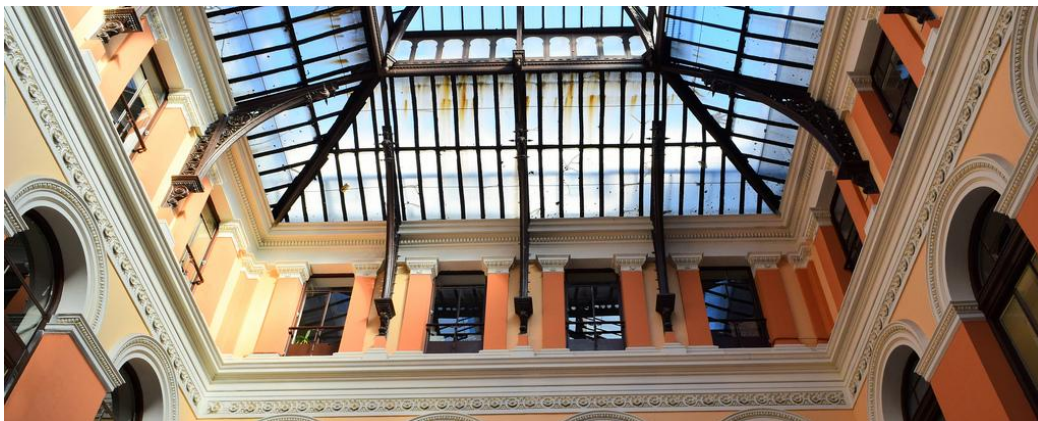


Figura 3. Vista interior del Palacio de Fomento. M Roa. 2015. www.flickr.com

La sala de columnas de la primera planta, que da al pórtico de la fachada, con su teoría de columnas pareadas, completa la secuencia monumental añadida por Velázquez Bosco en el eje del edificio.

Dos patios de luces se habilitaron como zona de trabajo a los lados de la escalera imperial. Se cubren con una estructura metálica acristalada con piezas de fundición procedentes de los Altos Hornos de Vizcaya.

2.2.5. *Palacio de Cristal*

Fue concebido originalmente como invernadero para la Exposición de Flora de las Islas Filipinas (1887), colonia española por aquel entonces, y su diseño, a cargo del arquitecto Ricardo Velázquez Bosco, refleja a un tiempo el impacto de los materiales de construcción más vanguardistas de la época y la historia del colonialismo del siglo XIX.



Figura 4. Vista exterior del Palacio de Cristal. Håkan Svensson. 2006. <https://commons.wikimedia.org>

Las columnas de hierro colado, combinadas con grandes superficies de cristal, y su planta diáfana resultan de gran monumentalidad, y fueron, en su época, muy novedosas. Durante la Exposición de 1887, el Palacio de Cristal (Figura 4) presentaba especímenes de vegetación exótica enmarcados en un contexto arquitectónico técnicamente innovador, una fusión destinada a producir una imagen de fantasía e irrealidad en los visitantes.

2.2.6. *Congreso de diputados*

El edificio se construyó entre 1843 y 1850, fue inaugurado el 31 de octubre de 1850 por la Reina Isabel II según el proyecto del arquitecto don Narciso Pascual y Colomer (1801-1870).

La sala principal (Figura 5), en forma de herradura, presenta dos alturas: el primer cuerpo donde se sitúan la mayoría de asientos, con columnas de mármol oscuro de estilo toscano; y un nivel superior, dividido por columnas abalaustradas de forja. Casi todo el espacio lo ocupan los escaños de los miembros del Gobierno y los diputados, y por encima de los mismos, el espacio reservado a los invitados, prensa, cuerpo diplomático, público y a los senadores cuando las cámaras se reúnen en sesión conjunta.



Figura 5. Vista interior del Congreso de los diputados. 2012. www.once.es

2.2.7. Banco de España. Patio de Operaciones

Para la construcción de la actual sede del Banco de España se adquirió en 1882 el palacio del marqués de Alcañices, situado en la calle de Alcalá con vuelta al Paseo del Prado.

En el interior, y en lo que al edificio original se refiere, destacan la escalera de honor y el patio, que fue la caja general y que hoy ocupa la biblioteca, al que se le incorporó una estructura de hierro fundido, encargada a la Fábrica de Mieres.



Figura 6. Vista interior del Patio de Operaciones. 2013. www.bolsamania.com

La ampliación decidida en 1927 y terminada en 1934 incorporó, en el interior del edificio, las novedades arquitectónicas de la época a las que Yarnoz había renunciado en el exterior. El nuevo patio de operaciones (Figura 6), con una altura de 27 metros y una superficie de unos 900 metros cuadrados, se aparta de los conceptos clásicos y recoge algún ejemplo del Art Decó, como la vidriera superior o el reloj, pieza decorativa y

funcional situada en el centro del patio. También destacan la rotonda, que sirve de enlace interior entre los dos edificios.

2.2.8. Teatro de la Comedia

El Teatro de la Comedia (Figura 7) se construyó en 1874 en un solar de la calle del Príncipe, propiedad de D. Silverio López de Larrainza. El arquitecto manchego Agustín Ortiz de Villajos fue el encargado de su construcción.



Figura 7. Vista interior del Teatro de la Comedia. Antonio Castro. 2015. www.madrididiario.es

La Comedia se trazó en tres pisos y una platea con planta en forma de herradura. El interior fue construido con pasillos amplios y dos cuerpos de escalera, a derecha e izquierda de la sala, para acceso a plantas superiores. Consta de doce palcos por planta, seis a cada lado, separados entre sí por un tabique con arco árabe y antepechos de hierro fundido. La mayor novedad en su decoración y estructura fue la abundante utilización de elementos de fundición y de hierro forjado en sustitución de la madera, lo que aportaba una sensación de mayor ligereza al conjunto.

3. Mercado de San Miguel

Para la elección del edificio a estudiar, se han valorado una gran variedad de aspectos: facilidad de acceso a la documentación (información sobre el edificio, plantas, secciones, alzados, rehabilitaciones, etc.); complejidad del edificio (una escala adecuada para el trabajo que se va a realizar); acceso al edificio para la toma de datos; carácter protegido del edificio; estructura metálica vista; uso del edificio.

Finalmente, analizando todos los criterios anteriores, se decide tomar como caso de estudio el Mercado de San Miguel.

3.1.Descripción del edificio

El edificio está situado en la plaza de San Miguel con fachadas a la Plaza del Conde de Miranda y a la Cava de San Miguel (Figura 8). Su construcción, bajo la dirección de Alfonso Dubé y Díez, se concluyó en 1916.



Figura 8. Vista exterior del Mercado de San Miguel. 2015.

Instalado en su origen al aire libre, en 1835 se realiza un proyecto, por Joaquín Henri, para cubrirlo, del que sólo se ejecutan más que unas portadas, eliminando el mal efecto que a la plaza le producían los cajones dispares en los comerciantes. En 1911 se encarga el proyecto definitivo a Alfonso Dubé. Consta de una planta baja con estructura metálica de soportes de hierro fundido y un sótano para almacenes.

La singularidad de la construcción contribuye a la riqueza edificatoria y a la mezcla de usos que caracteriza la zona. Contrasta su aspecto ligero y abierto con las potentes bases de granito de la edificación más antigua. La actividad que alberga se ha mantenido, bajo formas diversas, en el mismo lugar desde hace siglos. Su construcción se realizó en el espacio libre ocupado hasta entonces por un mercado al descubierto.

La construcción en hierro hacía décadas que ofrecía soluciones específicas para la construcción de estaciones, mercados, puentes, etc., y no resultaba novedosa. Aquí permitió resolver con eficiencia las necesidades funcionales, sin descuidar la composición y la ornamentación. La organización de la planta se aparta de la habitual en otros mercados de la época, concebidos de modo académico: como un contenedor con unos ejes claramente definidos y un sólido cerramiento perimetral. En este caso parece no existir un esquema compositivo previo, sino el derivado de la agrupación de los puestos en pequeñas manzanas situadas entre calles ortogonales, disposición ésta que reproduce la colocación de los primitivos cajones de madera.



Figura 9. Vista interior del Mercado de San Miguel. Rafael Oga. 2013. www.rafaeloga.com

El orden modular y la forma de construcción resultan también totalmente aparentes, para mostrar un bosque de columnas que sostiene una techumbre formada por el cruce de armaduras ligeras, a la manera de ramas que protegen y dejan pasar la luz (Figura 9). Así, la cubierta surge como uno de los elementos más interesantes y singulares del edificio. Es de destacar el discreto y ligero aspecto exterior de ésta, con sus bandas de persianas y poca altura, lo que contribuye, junto con la esbeltez y elegancia de las columnas exteriores, a la corrección del conjunto.

En el momento de su entrada en servicio fue muy celebrado el lujo de detalles con que se resolvían los problemas higiénicos, de aislamiento y ventilación, que se planteaban en las edificaciones similares. En consecuencia, el proyecto, que parte de la necesidad simple de dotar de protección y mejorar las condiciones higiénicas de una actividad ya existente y que respeta su organización en planta, trasciende el hecho funcional y, con economía de medios, produce una edificación de tipología y cualidades singulares, donde un marcado funcionalismo se combina equilibradamente con una ornamentación de inspiración clasicista transformada por la actitud modernista de la época.

El Mercado de San Miguel es el único ejemplo de su género que se conserva tras la demolición de los mercados de la Cebada y de los Mostenses. En **1999** está en curso una **obra de rehabilitación** y mejora a cargo del arquitecto Juan García Barquero, Director de la Oficina Comarcal de Rehabilitación de Edificios Madrid-Periferia. A pesar de la rehabilitación, la actividad comercial decayó mucho.

Sin embargo, una comunidad de empresarios lo compró y a partir de entonces el Mercado recuperó la importancia comercial que había llegado a tener. La rehabilitación duró dos años y fue proyectada y dirigida por el arquitecto Juan Miguel Alarcón García.

Resalta la magnífica estructura liberando el peto exterior de fábrica de ladrillo y amplía el cerramiento exterior de vidrio hasta el suelo.

3.2. Plantas, Secciones y Alzados

Para la búsqueda de los distintos planos del Mercado de San Miguel se han consultado distintas fuentes. En un primer momento se investigó en el Archivo de la Villa, pues tienen documentos de algunos edificios históricos. Sin embargo, no existía documentación referente a este edificio.

A continuación se realizó una investigación en el ayuntamiento de Madrid. No fue posible solicitar la documentación referente al edificio. Por tanto, se procedió a buscar documentos en bibliografías relacionadas con el Mercado. Así pues, los planos utilizados para realizar la investigación son una mezcla de los Planos originales, artículos relacionados con intervenciones en el Mercado y comprobación de estos documentos con el Mercado actual (Figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18). A pesar de contar con los siguientes documentos, el estudio de las medidas del edificio se realiza mediante inspección visual, siempre que sea posible.

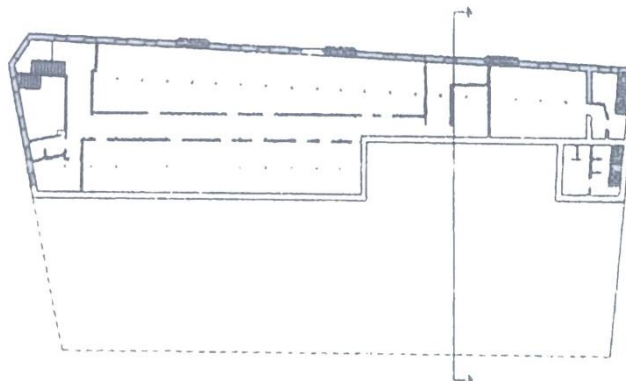


Figura 10. Planta Sótano. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

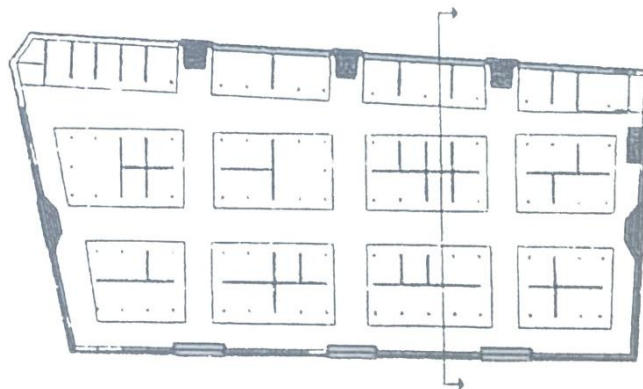


Figura 11. Planta Baja. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

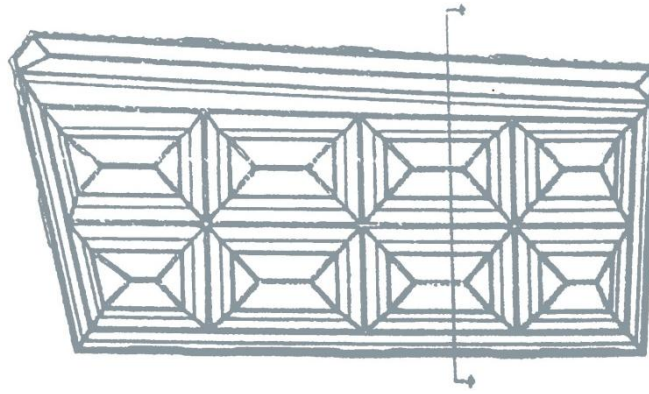


Figura 12. Planta de Cubiertas. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

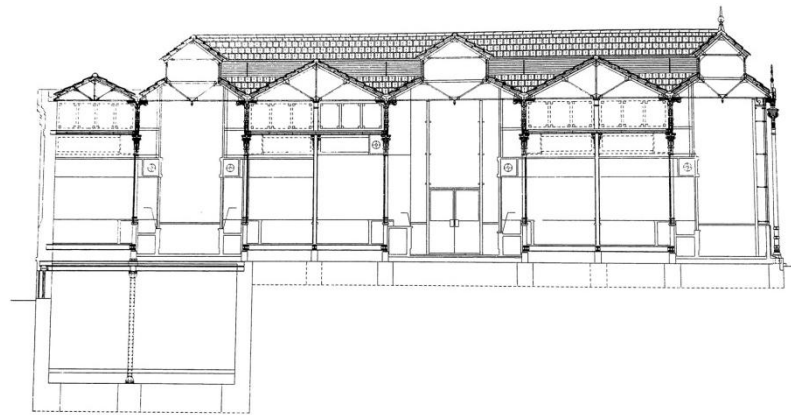


Figura 13. Sección Transversal. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

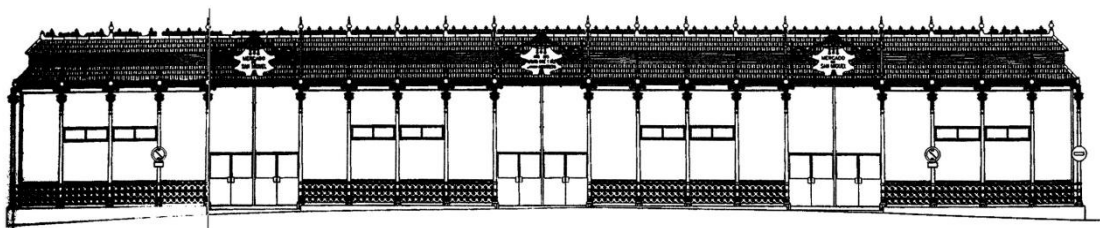


Figura 14. Alzado Norte. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

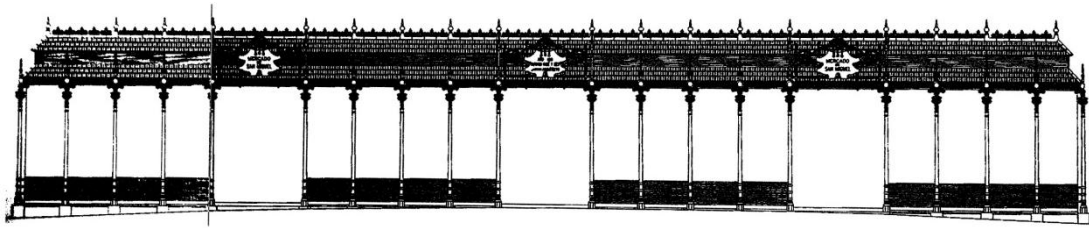


Figura 15. Alzado Sur. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

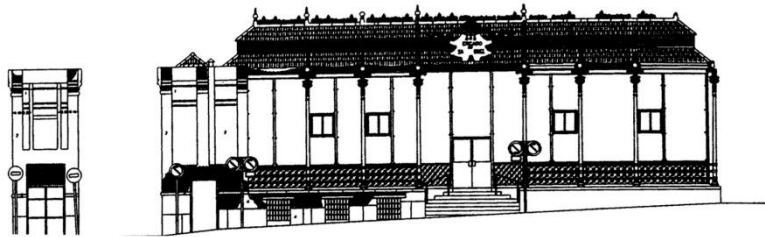


Figura 16. Alzado Este. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

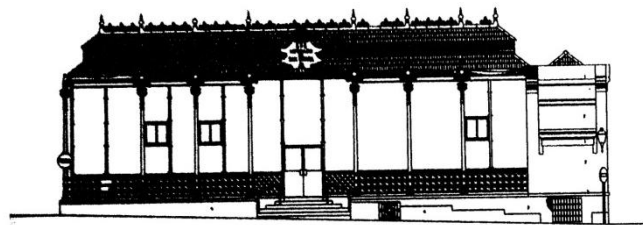


Figura 17. Alzado Oeste. Chueca Goitia, F. Arquitectura de Madrid s. XX. 1999.

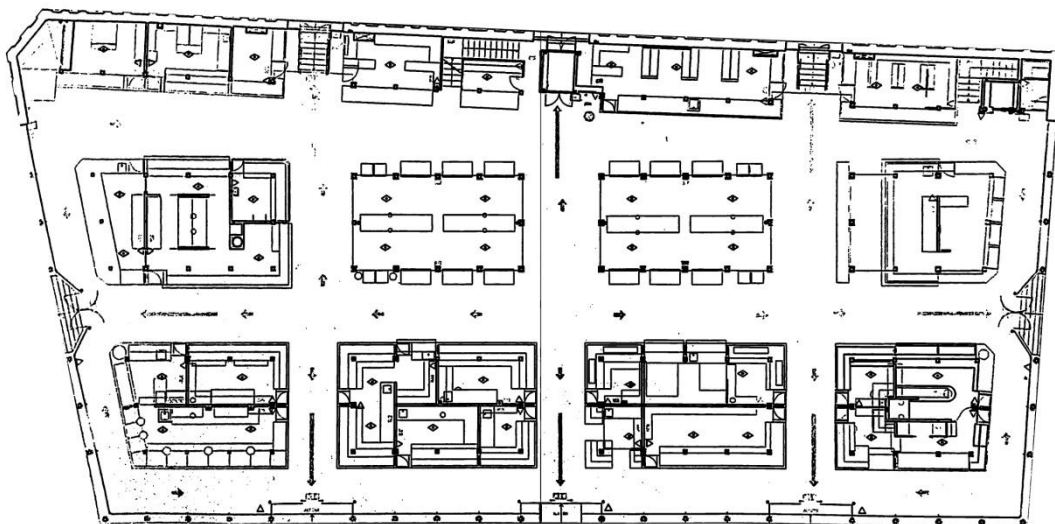


Figura 18. Planta Baja. Elaborada a partir de los planos de emergencia del Mercado. 2015.

3.3. Clasificación del Edificio

A continuación se realiza un **análisis urbano** de las características del edificio. Lo que se pretende con este análisis es conocer el estado actual del Mercado, así como las posibles protecciones que pudiera tener el edificio, lo que limitará las posibles actuaciones.

3.3.1. Estado actual de la parcela

A partir del *Plan General de Ordenación Urbana de Madrid* se han recogido los siguientes datos correspondientes a la parcela del Mercado de San Miguel.

- Localización:
 - Ámbito de Ordenación: NZ 1 Grado 5º
 - Área de reparto: Constituye un área de reparto en sí misma.
 - Distrito: 01 Centro
 - Barrio: Palacio
- Información de Parcela:
 - Nombre: Mercado de San Miguel
 - Dirección Principal: Plaza San Miguel SN
 - Dirección(es) GIS: Plaza San Miguel 11
 - Superficie estimada: 1.201,37 m²
 - Área GIS: 1.201,3727 m²
 - Nº de Catálogo: 07088
 - Nº de Manzana: 0101060
 - C.P.: 28005
- Condiciones de Catalogación:
 - Grado de Protección: Singular
 - Protecciones Normativas: Conjunto Histórico de la Villa de Madrid.
 - Rango superior: Monumento
 - Protección Arqueológica: Z.P.A. del Recinto Histórico

3.3.2. Equipamiento Social

A partir del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid, buscamos que tipo de edificio es en relación al equipamiento social. Observamos que se trata de un edificio de *Equipamiento Social Intensivo* (Figura19).

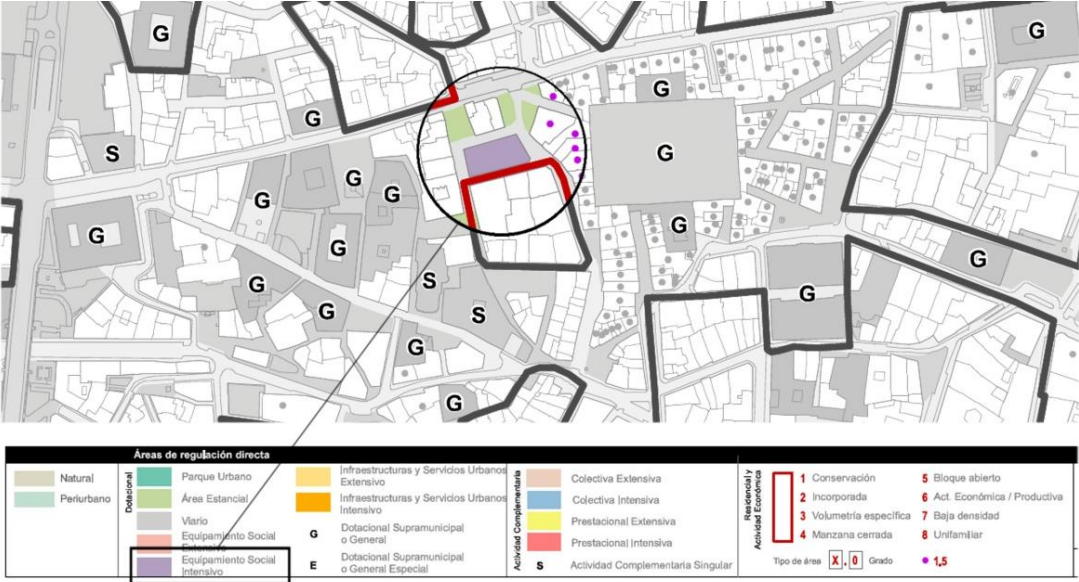


Figura 19. Revisión del plan general de Madrid. Regulación de Condiciones de Edificación. P-07. 1997.

3.3.3. Tipo de Edificio

A partir del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid, buscamos que tipo de edificio es. Observamos que se trata de un edificio *Bien de Interés Patrimonial* (Figura 20).

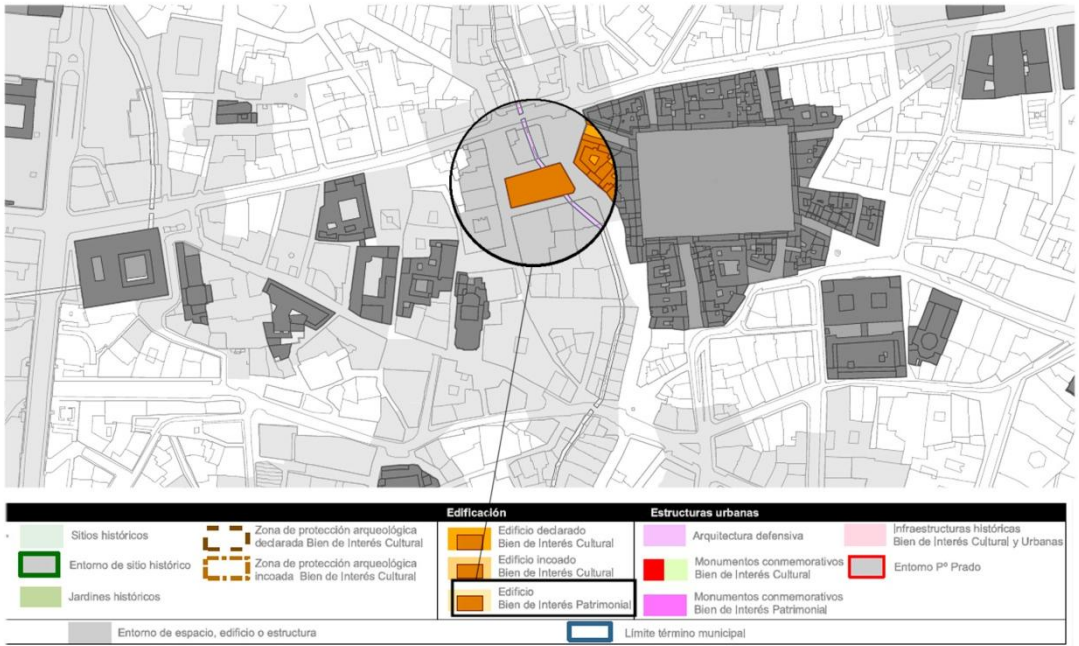


Figura 20. Revisión del plan general de Madrid. Elementos integrantes del Patrimonio histórico. P-08.1997.

3.3.4. Categoría del Edificio

A continuación buscamos en el *Catálogo de bienes y espacios protegidos* (PGOUM 1997) para ver que categoría tiene el edificio y poder saber que intervenciones son aplicables al mismo.

BIENES DE INTERÉS CULTURAL (BIC)	CATEGORÍAS	ENTORNOS DE PROTECCIÓN	DECLARADO O INCOADO	FECHA DECLARACIÓN O INCOACIÓN	GRADO CATALOGACIÓN PG '97	Nº CATÁLOGO PG '97
	MONUMENTOS					
Instituto Internacional.	X	SI	D	RD 3385/1982 de 27.11 BOE 25.01.1982	Singular	13094
Edificio de "La Corrala" C/ sombrerete, 13 y C/ Tribulete, 12.	X	SI	D	O 22.11.1977 BOE 5.01.1978	Singular	05459
Mercado de San Miguel.	X	SI	D	D 265/2000 de 14.12 BOCM 22.12.2000 y 8.20.2001	Singular	07088
Monasterio del Corpus Christi "Las Carboneras"	X	SI	D	RD 1755/1981 de 5.06 BOE 10.08.1981	Singular	07077
Palacio de Altamira.	X	SI	D	RD 1798/1977 de 10.06 BOE 16.7.1977	Singular	02122
Palacio de Gamazo.	X	SI	D	RD 786/1978 de 2.03 BOE 22.04.1978	Estructural	25826

Figura 21. Revisión del Plan General de Madrid. Catálogo de Bienes y espacios protegidos. 1997.

Se observa que el Mercado de San Miguel es un edificio catalogado como *Singular*, y por tanto, se aplica una protección al mismo (Figura 21). A continuación se detalla en qué consiste el tipo de protección.

Para saber qué tipo de protección es aplicable, se busca en el *Catálogo de bienes y espacios protegidos. Revisión del Plan, Área de Gobierno de Urbanismo y Vivienda*. En este documento se encuentra la siguiente información referente a *Edificios de Interés Singular*:

“3.3.- Condiciones aplicables a las categorías de protección. En virtud de la categoría de protección de cada edificio las prescripciones del régimen general de Intervenciones y Obras, con las limitaciones de lo prescrito en cada Ficha Urbanística para cada una de las áreas y elementos protegidos, se amplían o matizan con las siguientes precisiones:

b) Edificios de Interés Singular.

Con carácter general, se prescriben preferentemente para este tipo de edificios las Intervenciones de Restauración, aunque se admiten también Intervenciones de Rehabilitación, mediante obras de acondicionamiento cuando tengan por objeto mejorar en los edificios las condiciones de habitabilidad en cuanto a salubridad, accesibilidad y adecuación a la normativa técnica vigentes de sus dotaciones de servicio, siempre con la limitación de no afectar a áreas o elementos que contengan valores relevantes o muy relevantes a preservar.”

Por tanto, a partir de esta normativa, se entiende que se pueden realizar **Intervenciones de Rehabilitación**, siempre que las obras tengan como objeto mejorar la salubridad,

accesibilidad y adecuación a la normativa técnica. Es decir, que se pueden hacer intervenciones en el edificio, siempre que no afecten a los valores relevantes, como pinturas intumescentes (que no modifiquen la imagen del edificio) y rociadores automáticos. Sin embargo, no está permitido modificar los huecos y la apariencia exterior, así como la cubierta y la estructura.

4. Estudio del método del tiempo equivalente

Para estudiar la resistencia a fuego de la estructura del Mercado del San Miguel se acudirá al Código Técnico de la Edificación (CTE 2006). Sin embargo, dicho documento no alcanza en toda la amplitud de posibilidades, sobre todo cuando se trata de estudios en casos de edificios concretos. Para ello, el CTE permite recurrir al Eurocódigo (2004), documento que se consulta para poder llevar a cabo el estudio que se realiza en este trabajo.

4.1. Aplicación de la normativa actual

La acción de incendio se define como *“el flujo neto de calor que incide sobre la superficie de los elementos compartimentadores y/o estructurales expuestos al fuego durante el desarrollo de un incendio. Este flujo de calor debe determinarse considerando la transmisión de calor del incendio hacia la superficie del elemento debida a fenómenos de convección y radiación.”* (Cálculo de las estructuras de acero frente a incendio, APTA. 2009).

Por tanto, se trata de determinar la temperatura de la masa gaseosa que rodea a los elementos estructurales durante el incendio. Existen tres métodos para calcular dicha temperatura.

Los **métodos de nivel I y II** tienen la consideración de *métodos simplificados* a los efectos previstos en el CTE (*Código Técnico de la Edificación, 2006*) y la EAE (*Instrucción de Acero estructural, 2011*). Ambos métodos simplificados comparten el incendio normalizado como incendio de referencia.

Por su parte, el **método de nivel III** se sustituye el concepto de incendio normalizado por el denominado incendio real.

Para el caso del Mercado de San Miguel, se pretende aplicar el método de nivel I y II, no siendo posible aplicar el método de nivel III pues requiere de medios para hacer un incendio real con características análogas al edificio y de procedimiento destructivo.

En el **método simplificado de nivel I**, la acción de incendio se fija indirectamente por adopción de valores de resistencias al fuego suficientes, que son directamente las resistencias al fuego exigidas, sin aplicación de ningún coeficiente parcial de seguridad.

En la siguiente tabla del CTE (Tabla 1) se indican los valores, expresados en minutos de exposición al *fuego normalizado*, en función del uso y la altura de evacuación:

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante altura de evacuación del edificio		
		≤15 m	≤28 m	>28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

⁽¹⁾ La resistencia al fuego suficiente R de los elementos estructurales de un suelo que separa sectores de incendio es función del uso del sector inferior. Los elementos estructurales de suelos que no delimitan un sector de incendios, sino que están contenidos en él, deben tener al menos la resistencia al fuego suficiente R que se exija para el uso de dicho sector

⁽²⁾ En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

⁽³⁾ R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

⁽⁴⁾ R 180 cuando se trate de aparcamientos robotizados.

Tabla 1 .Resistencia al fuego suficiente de los elementos estructurales. DB-SI 6. 2006.

En este caso la altura de evacuación es menor de 15 metros y el uso del sector es comercial o pública concurrencia, por lo que la clase resistente es **R-90**. Acudiendo a la curva normalizada tiempo-temperatura se obtiene que en 90 minutos se alcanza una temperatura de 1000° (Tabla 2).

La *curva normalizada tiempo-temperatura* es la curva nominal definida en la norma UNE EN 1363:2000 para representar un modelo de *fuego totalmente desarrollado* en un *sector de incendio*.

Está definida por la expresión:

$$\Theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8 t + 1) \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (\text{B.1})$$

siendo:

Θ_g temperatura del gas en el sector [$^{\circ}\text{C}$];

t tiempo desde la iniciación del incendio [min].

La *curva normalizada tiempo-temperatura* supone, aproximadamente, las siguientes temperaturas:

Tiempo t, en minutos	15	30	45	60	90	120	180	240
Temperatura en el sector Θ_g , en $^{\circ}\text{C}$	740	840	900	950	1000	1050	1100	1150

Tabla 2. Temperaturas de la curva normalizada tiempo-temperatura. Anejo B.2. DB-SI 6. 2006.

Debido a que la transferencia de calor a la estructura sufre un retardo, es posible que la temperatura en la estructura esté entre 100 $^{\circ}\text{C}$ y 200 $^{\circ}\text{C}$ menos que la temperatura del sector. Por tanto, nos encontraríamos con una temperatura del acero estructural de entre 800 $^{\circ}\text{C}$ y 900 $^{\circ}\text{C}$. A partir de estas temperaturas, acudimos a la siguiente tabla para ver la capacidad resistente de la estructura (Tabla 3):

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04	0,00
$k_{\lambda,\theta} = \lambda_{\theta} / \lambda$	1,00	1,05	1,11	1,19	1,14	1,23	1,33	-	-	-	-

Tabla 3. Valores de los parámetros mecánicos del acero en función de la temperatura. Anejo D.2. DB-SI 6. 2006.

En este supuesto, la resistencia de la estructura sería del 6% respecto al estado frío. Por lo tanto, la estructura sin proteger tiene una resistencia muy inferior. Por otra parte,

debido a la catalogación del edificio, no se puede proteger con los sistemas habituales sin afectar a las características arquitectónicas y elementos decorativos.

Una vez descartado el **método de nivel I** debido a las características del edificio, acudimos al **método de nivel II** que establece el CTE. En este método, la acción de incendio se caracteriza mediante el denominado **tiempo equivalente de exposición al fuego normalizado** (Figura 22).

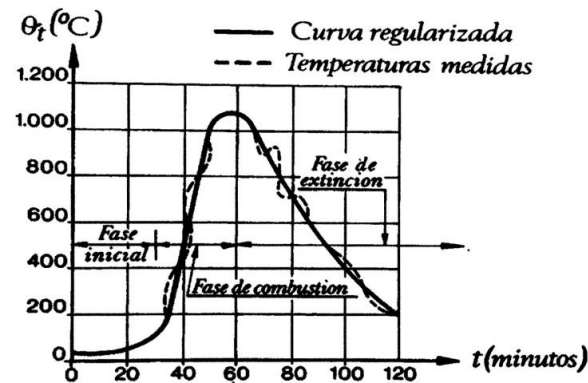


Figura 22. Gráfica de la curva tiempo-temperatura. Cálculo de las estructuras de acero frente a incendio, APTA. 2009.

El incendio normalizado establece una relación directa y progresiva entre el tiempo y la temperatura del sector; por su parte, el método de nivel II se caracteriza por no imponer temperaturas en el acero estructural superiores a la máxima temperatura alcanzada en dicho material durante el incendio *real*.

Se entiende por modelos de incendio *real* aquellos que reproducen la variación a lo largo del tiempo de la temperatura ambiente, de forma ajustada a la experimentada realmente en el sector que se está analizando el incendio.

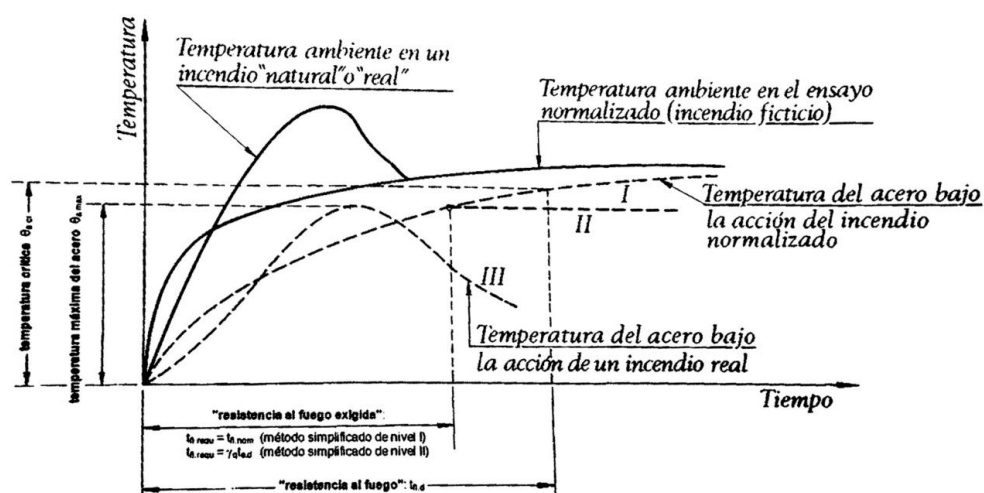


Figura 23. Definición clásica de tiempo equivalente. Cálculo de las estructuras de acero frente a incendio, APTA. 2009.

Sin embargo, para poder caracterizar gráficamente con mayor exactitud posible el método de nivel II, se utiliza una curva temperatura del acero-tiempo coincidente con la del método de nivel I hasta un instante, y se mantiene de forma indefinida una temperatura constante en el acero a partir de dicho instante (Figura 23).

De modo que el **tiempo equivalente de exposición al fuego normalizado** está en términos temporales en lugar de temperaturas. Esta magnitud es el intervalo de tiempo necesario para que se alcance en el acero la misma temperatura máxima que bajo la acción del incendio real.

Para el cálculo del tiempo equivalente de exposición al fuego normalizado, influyen los siguientes factores del edificio:

- Medidas activas en la lucha contra el fuego.
- El riesgo de inicio de incendio en función del uso del edificio.
- El riesgo de inicio de incendio en función del tamaño del sector.
- El tipo de materiales estructurales.
- La utilización de materiales protectores.
- Las características térmicas del entorno (paredes, techo y suelo).
- Las condiciones de ventilación del sector de incendio.
- Aplicación de coeficientes en función usos especiales (hospitales) y alturas de evacuación.

5. Variables de diseño

A continuación se estudia en detalle todas las variables de diseño que influyen en el cálculo del tiempo equivalente de exposición al fuego normalizado. Se comentarán todas las hipótesis posibles y se obtendrán los distintos tiempos obtenidos en función de las medidas adoptadas.

5.1. Sectorización

Existe una planta baja y una planta sótano. Se consideran dos sectores totalmente distintos con accesos independientes. De este modo, el trabajo se centrará en el sector de la planta baja.

Área de la planta baja = 1.158 m²

Según la normativa para edificios de uso comercial, la superficie máxima para cada sector es de 2.500 m². Por tanto, no es necesario crear varios sectores en la planta baja y se tomará como válido un sector único.

5.2. Ocupación

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en la evacuación de las personas del edificio es saber si se dispondrá de detectores de humo. Para ello, calculamos la ocupación del edificio y distinguimos por plantas, ya que no tendrán los mismos usos (Tabla 4):

Uso previsto	Zona, tipo de actividad	Ocupación (m ² /persona)
Comercial	En establecimientos comerciales:	
	áreas de ventas en plantas de sótano, baja y entreplanta	2
	áreas de ventas en plantas diferentes de las anteriores	3
	En zonas comunes de centros comerciales:	
	mercados y galerías de alimentación	2
	plantas de sótano, baja y entreplanta o en cualquier otra con acceso desde el espacio exterior	3
	plantas diferentes de las anteriores	5
	En áreas de venta en las que no sea previsible gran afluencia de público, tales como exposición y venta de muebles, de vehículos, etc.	5

Tabla 4. Densidades de ocupación. DB-SI 6. 2006.

Planta baja:

Uso comercial en áreas de ventas = 2 m²/persona

Ocupación = 1.158 m² / 2 m²/persona = 579 personas

Ocupación Total= 592 personas

A continuación se estudia si es necesario o no la instalación de detectores de humo en función de la ocupación (Apartado 5.3).

5.3. Instalaciones

A partir del DB-SI 4, analizamos la dotación de instalaciones de protección contra incendios necesaria en función de las características del edificio (Tabla 5):

Uso previsto del edificio o establecimiento	Condiciones
Instalación	
Comercial	En toda agrupación de locales de riesgo especial medio y alto cuya superficie construida total excede de 1.000 m ² , extintores móviles de 50 kg de polvo, distribuidos a razón de un extintor por cada 1 000 m ² de superficie que supere dicho límite o fracción.
Extintores portátiles	
Bocas de incendio equipadas	Si la superficie construida excede de 500 m ² . ⁽⁶⁾
Columna seca ⁽⁶⁾	Si la altura de evacuación excede de 24 m.
Sistema de alarma	Si la superficie construida excede de 1.000 m ² .
Sistema de detección de incendio ⁽¹⁰⁾	Si la superficie construida excede de 2.000 m ² . ⁽⁹⁾
Instalación automática de extinción	Si la superficie total construida del área pública de ventas excede de 1.500 m ² y en ella la densidad de carga de fuego ponderada y corregida aportada por los productos comercializados es mayor que 500 MJ/m ² , contará con la instalación, tanto el área pública de ventas, como los locales y zonas de riesgo especial medio y alto conforme al capítulo 2 de la Sección 1 de este DB.
Hidrantes exteriores	Uno si la superficie total construida está comprendida entre 1 000 y 10 000 m ² . ⁽⁴⁾ Uno más por cada 10 000 m ² adicionales o fracción.

Tabla 5. Dotación de instalaciones de protección contra incendios. DB-SI 4. 2006.

Serán de **obligado cumplimiento**: extintores portátiles; bocas de incendio equipadas; sistema de alarma; hidrantes exteriores.

Serán **dotaciones opcionales**: Columna seca; sistema de detección de incendio; instalación automática de extinción.

A continuación se estudia el **Control del humo de incendio** (Tabla 6):

- 1 En los casos que se indican a continuación se debe instalar un sistema de control del humo de incendio capaz de garantizar dicho control durante la evacuación de los ocupantes, de forma que ésta se pueda llevar a cabo en condiciones de seguridad:
 - a) Zonas de uso *Aparcamiento* que no tengan la consideración de *aparcamiento abierto*;
 - b) *Establecimientos de uso Comercial o Pública Concurrencia* cuya ocupación exceda de 1000 personas;
 - c) *Atrios*, cuando su ocupación en el conjunto de las zonas y plantas que constituyan un mismo sector de incendio, exceda de 500 personas, o bien cuando esté previsto para ser utilizado para la evacuación de más de 500 personas.

Tabla 6. Control de humo de incendio. DB-SI 4. 2006.

Al analizar la evacuación del edificio en caso de incendio para *uso Comercial*, observamos que es obligatoria la **instalación de detectores de humo** cuando la ocupación exceda de 1000 personas. Como la ocupación resultante es de 592 personas (calculada en el apartado 5.2), **no es obligatoria** la instalación. Debido a la consideración voluntaria de la instalación de detectores de humo, se plantea como hipótesis.

A continuación se muestran los valores de los coeficientes según las medidas activas instaladas en el edificio (Tabla 7):

Detección automática $\delta_{n,1}$	Alarma automática a bomberos $\delta_{n,2}$	Extinción automática $\delta_{n,3}$
0,87	0,87	0,61

Tabla 7. Valores de los coeficientes δ_n según las medidas activas existentes. Anejo B. DB-SI. 2006.

Esta decisión influirá en el valor del tiempo equivalente a través del coeficiente que tiene en cuenta las medidas de protección activas existentes, δ_n , uno de los factores que intervienen en la obtención del **valor de cálculo de la densidad de carga de fuego**. Si no se instala alguna de las medidas, su valor vale $\delta_n = 1$.

A continuación se muestran las posibles hipótesis a adoptar:

- Hipótesis A.** Ausencia de todas las medidas activas. $\delta_n = 1$
- Hipótesis B.** Detección automática o Alarma automática a bomberos. $\delta_n = 0,87$
- Hipótesis C.** Extinción automática. $\delta_n = 0,61$
- Hipótesis D.** Detección automática y Alarma automática a bomberos. $\delta_n = 0,87 * 0,87 = 0,76$
- Hipótesis E.** [Detección automática o Alarma automática a bomberos] + Hipótesis C. $\delta_n = 0,87 * 0,61 = 0,53$
- Hipótesis F.** Hipótesis A + Hipótesis B + Hipótesis C. $\delta_n = 0,87 * 0,87 * 0,61 = 0,47$

A partir de la altura de evacuación del edificio se estudia las posibles consecuencias del incendio (Tabla 8):

Altura de evacuación	δ_c
Edificios con altura de evacuación descendente de más de 28 m o ascendente de más de una planta.	2,0
Edificios con altura de evacuación descendente entre 15 y 28 m o ascendente hasta 2,8 m. Aparcamientos bajo otros usos.	1,5
Edificios con altura de evacuación descendente de menos 15 m o de uso Aparcamiento exclusivo	1,0

Tabla 8. Valores de δ_c por las posibles consecuencias del incendio, según la altura de evacuación del edificio. Anejo B. DB-SI. 2006.

Debido a que la altura de evacuación descendente es menor de 15 metros, el valor de δ_c es igual a 1.

5.4. Ventilación

El desarrollo de un incendio depende tanto de la aportación de oxígeno a través de las aberturas del recinto como de la evacuación de humos y calor.

El coeficiente de ventilación, w_f , así lo recoge, y su valor varía con la alternativa de sectorización adoptada. Sin embargo, debido a que se trata de dos sectores totalmente independientes, solo afecta para el cálculo el valor de la planta baja.

En el caso del Mercado de San Miguel, está abierto casi en la totalidad del perímetro del edificio. A continuación se muestran imágenes que muestran el paso continuo de aire al interior del edificio (Figuras 24 y 25):



Figura 24. Vista exterior del Mercado de San Miguel. 2015.



Figura 25. Vista interior del Mercado de San Miguel. 2015.

Para el cálculo del coeficiente de ventilación es necesario saber la altura libre. Para poder calcularlo, hallamos un valor medio de altura libre:

Superficie de Altura mínima, $S_{H_{\min}}$:

Altura libre mínima, $h_{\min} = 3,2 \text{ m}$;

$$S_{H_{\min}} = 490 \text{ m}^2$$

Superficie de Altura máxima, $S_{H_{\max}}$:

Altura libre máxima, $h_{\max} = 6 \text{ m}$;

$$S_{H_{\max}} = 711 \text{ m}^2;$$

Altura media, H_{media} :

$$H_{\text{media}} = ((h_{\min} * S_{H_{\min}}) + (h_{\max} * S_{H_{\max}})) / S_{\text{total}} =$$

$$= ((3,2 \times 490) + (6 \times 711)) / 1.201 = 4,85 \text{ m};$$

$$\mathbf{H_{\text{media}} = 4,85 \text{ m}}$$

El coeficiente de ventilación se obtiene como indica el CTE (2006) según los significados indicados en el código. En este caso al ser un recinto de altura libre variable se toma el valor medio hallado anteriormente, por lo tanto $H = 4,85$ m.

$$w_f = (6/4,85)^{0,3} [0,62 + 90 (0,4 - \alpha_v)^4 / (1 + b_v \alpha_h)] \geq 0,5$$

A continuación hallamos los valores para las hipótesis que se plantean:

• Hipótesis W_1

Esta hipótesis hace referencia a los valores para el estado actual del edificio. Es decir, en caso de que no se modifique ningún hueco ni en fachada ni en cubierta. A continuación se calculan los valores que intervienen en el cálculo:

$\alpha_v = A_v / A_f$, relación entre la superficie de las aberturas en fachada y la superficie de suelo del sector. Con los límites $0,025 < \alpha_v < 0,25$

$$A_v = A_v' = (((44 \times 0,5) \text{ m}^2 \times 2) + ((14 \times 0,5) \text{ m}^2 \times 2)) \times 2^* = 116 \text{ m}^2$$

*Debido a que el vidrio no llega hasta el techo, hay una abertura equivalente a la de las rejillas. Por tanto, la abertura total es dos veces la abertura de las rejillas.

$$A_f = 1.158 \text{ m}^2$$

$$\alpha_v = 116 / 1.158 = 0,1;$$

$$\alpha_v = 0,1$$

$\alpha_h = A_h / A_f$, relación entre la superficie de las aberturas en el techo, A_h , y la superficie construida del suelo del sector, A_f .

$$\text{Altura rejilla} = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{Perímetro de rejillas en el techo} = 24 + 26 + 26 + 22 + 22 + 26 + 26 + 26 = 198 \text{ m}$$

$$A_h = 0,5 \text{ m} \times 198 \text{ m} = 99 \text{ m}^2$$

$$A_f = 1.158 \text{ m}^2$$

$$\alpha_h = 99 \text{ m}^2 / 1.158 \text{ m}^2 = 0,086;$$

$$\alpha_h = 0,086$$

$$b_v = 12,5 (1 + 10 \alpha_v - \alpha_v^2) \geq 10$$

$$b_v = 12,5 (1 + (10 \times 0,1) - (0,1^2)) = 24,88 \geq 10;$$

$$b_v = 24,88$$

Despejamos en la ecuación y obtenemos el coeficiente de ventilación:

$$w_f = (6/4,85)^{0,3} [0,62 + 90 (0,4 - 0,1)^4 / (1 + (24,88 \times 0,086))] \geq 0,5$$

$$w_f = 1,0659 \times [0,62 + 0,729 / 3,14] = 0,908;$$

$$w_{f1} = 0,908$$

• Hipótesis W₂

Se estudia que factor de ventilación se obtendría en la hipótesis en la que el vidrio llegara a techo, reduciendo la entrada de aire. En esta hipótesis, los valores α_h y b_v son iguales. El valor α_v varía respecto de la hipótesis anterior. A continuación se muestra el cálculo:

$$\alpha_v = A_v / A_f, \text{ Con los límites } 0,025 < \alpha_v < 0,25$$

$$A_v = A_v' = ((44 \times 0,5) \text{ m}^2 \times 2) + ((14 \times 0,5) \text{ m}^2 \times 2) = 58 \text{ m}^2$$

$$A_f = 1.158 \text{ m}^2$$

$$\alpha_v = 58 / 1.158 = 0,05;$$

$$\alpha_v = 0,05$$

Despejamos en la ecuación y obtenemos el coeficiente de ventilación:

$$w_f = (6/4,85)^{0,3} [0,62 + 90 (0,4 - 0,05)^4 / (1 + (24,88 \times 0,086))] \geq 0,5$$

$$w_f = 1,0659 \times [0,62 + 1,35 / 3,14] = 1,119;$$

$$w_{f2} = 1,119$$

$$w_{f1} < w_{f2}$$

El resultado obtenido de w_{f2} es mayor que el de w_{f1} . Esto quiere decir que la hipótesis de cerrar una parte de los huecos en fachada tiene un efecto negativo en caso de incendio, ya que, como se verá más adelante, da un resultado de tiempo equivalente mayor que en el caso actual del edificio. Por tanto, aunque se plantea como hipótesis, no se tendrá en cuenta para el cálculo final debido a los resultados obtenidos.

5.5. Carga Combustible

La “carga combustible” o “carga de fuego”, es la suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio (elementos constructivos y contenidos del edificio), con excepción de aquellas materias que se encuentren en una solución acuosa o en un estado en el cual no son combustibles. El valor característico se obtiene de sumar el valor de la **carga de fuego permanente** (corresponde a los elementos constructivos combustibles incluidos los revestimientos y acabados permanentes del proyecto) y el **valor variable**.

5.5.1. Carga de fuego permanente

La densidad de carga de fuego permanente corresponde a los revestimientos y otros elementos combustibles permanentes incluidos en proyecto. Puede obtenerse a partir de los valores específicos aportados por el fabricante de cada producto o, en su defecto, a partir de tablas de valores para materiales genéricos.

Ya que la última reforma del edificio data del año 1999, se desconocen los valores específicos aportados por el fabricante. Por tanto, se opta por calcular los materiales combustibles del edificio de carácter permanente. Los valores que se aplican se obtienen de tablas para materiales genéricos.

A continuación se obtiene la carga de fuego total en la planta baja:

$$Q_{fi} = \sum M_i \cdot H_{ui} \cdot \psi_i = \sum Q_{fi,h,I}$$

donde:

Q_{fi} , carga de fuego total [MJ].

M_i , cantidad de material combustible [kg], obtenido de medir los elementos combustibles permanentes, y de la densidad del material.

H_{ui} , potencial calorífico neto [MJ/kg] valor tabulado en el EC-1 (Tabla 9).

Potencial calorífico neto H_u [MJ/kg] de materiales combustibles para calcular cargas de fuego

Sólidos	
Madera	17,5
Otros materiales celulósicos	20
* Tejido	
* Corcho	
* Algodón	
* Papel, cartón	
* Seda	
* Paja	
* Lana	

Tabla 9. Potencial calorífico neto H_u [MJ/kg] de materiales combustibles para calcular cargas de fuego. Eurocódigo 1. 2004.

Ψ_i , coeficiente que permite evaluar las cargas de fuego protegidas. Se estudian dos hipótesis: materiales protegidos, con $\Psi_i = 0$; y materiales no protegidos, con $\Psi_i = 1$.

En la planta baja, existen distintos tipos de material combustible:

- **Falso techo de madera en la zona de puestos.** Calculamos la cantidad de falso techo de madera que existe (Tabla 10), a partir del espesor medido y del área que ocupa, que se corresponden con la zona de los puestos (Figuras 26 y 27).



Figura 26. Vista interior del Mercado de San Miguel. Juan Luis. 2012. www.redajo.com

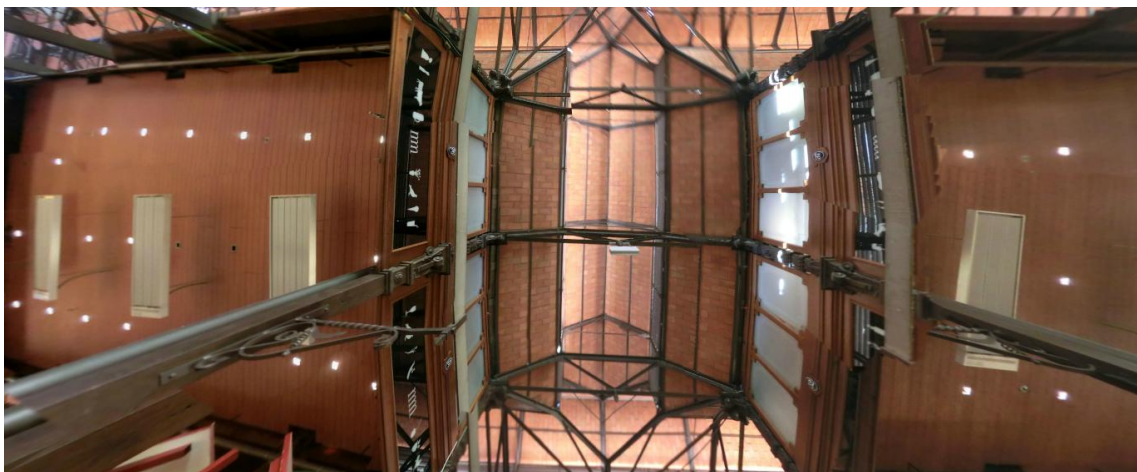


Figura 27. Vista interior del Mercado de San Miguel. Juan Luis. 2012. www.redajo.com

Carga de fuego del falso techo.							
Espesor [m]	Área [m ²]	V [m ³]	ρ [kg/m ³]	M [kg]	M_i [MJ/kg]	Q_{fi} [J]	Q_{fi} [MJ]
0,01	314	3,14	madera 500	1570	17,5	27475	27,475

Tabla 10. Carga de fuego del falso techo.

- **Carpintería de vidrios traslúcidos.** Existe una carpintería de madera que enmarca unos vidrios translúcidos (Figuras 28 y 29). Calculamos el espesor y la superficie que ocupa (Tablas 11 y 12).



Figura 28. Vista interior del Mercado de San Miguel. Juan Luis. 2012. www.redajo.com



Figura 29. Vista interior del Mercado de San Miguel. Juan Luis. 2012. www.redajo.com

Dimensiones carpintería de vidrios traslúcidos			
Espesor [m]	Dimensión lineal [m/m]	Dimensión [m]	Área [m²]
0,03	0,3	352	105,6

Tabla 11. Dimensiones carpintería de vidrios traslúcidos.

Carga de fuego carpintería de vidrios traslúcidos					
V [m³]	ρ [kg/m³]	M [kg]	M_i [MJ/kg]	Q_{fi} [MJ]	Q_{fii} [MJ]
3,168	madera 500	1584	17,5	27720	27,72

Tabla 12. Carga de fuego carpintería de vidrios traslúcidos.

A continuación, calculamos la Carga de fuego permanente total (Tabla 13), suma de las anteriores:

Carga de fuego permanente				
Falso techo de madera en la zona de puestos [MJ]	Carpintería de vidrios traslúcidos [MJ]	Total [MJ]	Superficie [m ²]	Total [MJ/m ²]
27,48	27,72	55,2	1158	0,048

Tabla 13. Carga de fuego permanente.

5.5.2. Carga de fuego variable

Se plantea la opción del cálculo real de la misma forma que se ha realizado la carga de fuego permanente. Sin embargo, debido al uso de Mercado, parece difícil realizar un cálculo aproximado, debido a la existencia variable de los distintos elementos: alimentos, puestos móviles, decoración, etc.

Sin embargo, se puede determinar con los valores del CTE (2006) tabulados en función del uso (Tabla 14). Al tratarse de un mercado, puede considerarse uso Comercial o Pública Concurrencia. Se considera del lado de la seguridad el valor correspondiente con uso Comercial:

Comercial	730
Residencial Vivienda	650
Hospitalario / Residencial Público	280
Administrativo	520
Docente	350
Pública Concurrencia (teatros, cines)	365
Aparcamiento	280

Tabla 14. Valores de densidad de carga de fuego variable. Característica según el uso previsto. Anejo B. DB-SI 6. 2006.

Valor característico de la **densidad de carga combustible variable** = **730 MJ/m²**

5.5.3. Carga de fuego Total

Como ya se ha señalado en el apartado 5.5.1, debido a la fecha de la rehabilitación del edificio (1999), se ha considerado que los materiales a efectos de carga permanente pueden ser protegidos o no. A continuación se muestran las dos hipótesis (Tabla 15):

Carga de fuego Total [MJ/m ²]	
Q1	Q2
Materiales no protegidos	Materiales protegidos
730,048	730

Tabla 15. Carga de fuego Total.

Analizando ambos resultados, se llega a la conclusión de que la carga de fuego permanente es despreciable. Por tanto, no se tiene en cuenta la hipótesis de proteger los materiales. De este modo, la **carga de fuego Total** para el cálculo es de **730 MJ/m²**.

5.6. Coeficiente de corrección según el material

Se trata de una estructura de pilares de fundición. Al tratarse de un edificio histórico no se puede proteger la estructura con los medios habituales sin afectar a las características arquitectónicas. Por tanto, calculamos el valor de k_c según el material estructural (Tabla 16):

Material de la sección transversal	k_c
Hormigón armado	1,0
Acero protegido	1,0
Acero sin proteger	13,7 · O

Tabla 16. Valores de k_c según el material estructural. Anejo B. DB-SI 6. 2006.

Para el coeficiente de corrección en función del material, k_c , se considera el más similar, el acero sin proteger, por lo que su valor es $13,7 \cdot O$, siendo O el coeficiente de aberturas y se obtiene a partir de:

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad \text{coeficiente de aberturas con los límites } 0,02 \leq O \leq 0,2 \text{ [m}^{1/2}\text{];}$$

A_t , superficie total de la envolvente del sector (paredes, suelo y techo), incluyendo aberturas [m²];

H , altura promedio de los huecos verticales, [m];

A_v , aberturas en fachada o techo [m²];

Como aberturas en fachada o en techo se deben considerar los huecos, lucernarios, ventanas (practicables o no), superficies acristaladas y, en general, toda zona susceptible de facilitar la entrada de aire en la zona en la que se desarrolle el incendio.

A continuación, se desarrolla el cálculo (Tabla 17):

Coeficiente de corrección en Acero sin proteger									
A_v [m²]			A_t [m²]				h [m]	O [m ^{1/2}]	k_c
Altura Ventanas [m]	Longitud [m]	A_v [m²]	Suelo [m²]	Techo [m²]	Fachada [m²]	A_t [m²]		$O = A_v \sqrt{h} / A_t$	$13,7 \cdot O$
0,5	360	180	1158	1158	1170	3486	6,5	0,132	1,804

Tabla 17. Coeficiente de corrección en Acero sin proteger.

6. Determinación del tiempo equivalente de exposición al fuego según la hipótesis desarrollada

6.1. Cálculo

El Tiempo equivalente de exposición al fuego se define en el CTE (2006) y en el EC-1 (2004) como “*el tiempo de exposición a la curva normalizada tiempo-temperatura que se supone que tiene un efecto térmico igual al de un incendio real en el sector de incendio considerado*”.

El tiempo equivalente es el tiempo de ensayo normalizado en que un elemento alcanza una pérdida de capacidad resistente como la máxima que sucede en el incendio real estudiado. Su valor se puede obtener a partir de la siguiente expresión con los significados indicados en el CTE (2006):

$$T_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d}$$

k_b , coeficiente de conversión en función de las propiedades térmicas de la envolvente del sector; que puede tomarse igual a 0,07 [min x m²/MJ]. El anejo F de la norma UNE EN 1991-1-2:2004 aporta valores más precisos.

w_f , coeficiente de ventilación en función de la forma y tamaño del sector.

k_c , coeficiente de corrección según el material estructural.

$q_{f,d}$, valor de cálculo de la densidad de carga de fuego en función del uso del sector, en MJ/m².

Posteriormente, se analizarán los distintos datos obtenidos según valores tabulados y según los datos obtenidos mediante el cálculo.

Para el coeficiente de conversión en función de las propiedades térmicas de la envolvente del sector, k_b ; se ha tomado en todos los casos igual a 0,07, por defecto el valor máximo. Se podría ajustar al valor real, pero para ello se necesitarían los datos aportados por los fabricantes de los distintos materiales, además de ser estas variables en el tiempo.

6.2. Densidad de carga combustible de cálculo

La densidad de carga combustible de cálculo, $q_{f,d}$, se obtiene a partir de:

$$q_{f,d} = q_{f,k} * m * \delta_{q1} * \delta_{q2} * \delta_n * \delta_c$$

$q_{f,k}$, valor característica de densidad de carga de fuego.

m , coeficiente de combustión que tiene en cuenta la fracción del combustible que arde en el incendio. En los casos en los que el material incendiado sea de tipo celulósico (madera, papel, tejidos, etc.) puede tomarse $m = 0,8$. Cuando se trate de otro tipo de material y no se conozca su coeficiente de combustión puede tomarse $m = 1$ del lado de la seguridad.

δ_{q1} , coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de iniciación debido al tamaño del sector (Tabla 18):

Superficie del sector A_r [m ²]	Riesgo de iniciación δ_{q1}
<20	1,00
25	1,10
250	1,50
2 500	1,90
5 000	2,00
>10 000	2.13

Tabla 18. Valores del coeficiente δ_{q1} por el riesgo de iniciación debido al tamaño del sector. Tabla B.2. Anejo B. DB-SI 6. 2006.

Para obtenerlo, se interpola entre los valores para superficies de 250 m² y 2500 m². El coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de iniciación debido al tamaño del sector es $\delta_{q1} = 1,60$.

δ_{q2} , coeficiente que tiene en cuenta el riesgo de iniciación debido al tipo de uso o actividad (Tabla 19):

Actividad	Riesgo de iniciación δ_{q2}
Vivienda, Administrativo, Residencial, Docente	1,00
Comercial, Aparcamiento, Hospitalario, Pública Concurrencia	1,25
Locales de riesgo especial bajo	1,25
Locales de riesgo especial medio	1,40
Locales de riesgo especial alto	1,60

Tabla 19. Valores del coeficiente δ_{q2} por el riesgo de iniciación debido al uso o actividad. Anejo B. DB-SI 6. 2006.

El coeficiente debido al riesgo de iniciación debido al uso o actividad vale $\delta_{q2} = 1,25$.

δ_n , coeficiente que tiene en cuenta las medidas activas voluntarias existentes, $\delta_n = \delta_{n,1} * \delta_{n,2} * \delta_{n,3}$. Este valor depende de las diferentes hipótesis calculadas en el apartado 5.3.

δ_c , coeficiente de corrección según las consecuencias del incendio (Tabla 20):

Altura de evacuación	δ_c
Edificios con altura de evacuación descendente de más de 28 m o ascendente de más de una planta.	2,0
Edificios con altura de evacuación descendente entre 15 y 28 m o ascendente hasta 2,8 m. Aparcamientos bajo otros usos.	1,5
Edificios con altura de evacuación descendente de menos 15 m o de uso Aparcamiento exclusivo	1,0

Tabla 20. Valores del coeficiente δ_c por las posibles consecuencias del incendio, según la altura de evacuación del edificio. Anejo B. DB-SI 6. 2006.

Por tanto, el valor del coeficiente de corrección según las consecuencias del incendio vale $\delta_c = 1$.

6.3. Hipótesis

A continuación se muestran todas las hipótesis posibles que se han desarrollado para el cálculo del tiempo equivalente (Tabla 21). Se han agrupado por bloques en función de los parámetros que se estudian: instalaciones, ventilación, carga de fuego y corrección

del material. En el bloque de **instalaciones** se valoran distintas hipótesis: ausencia de medidas activas, detección automática, alarma automática y extinción automática. Cuando se realiza el cálculo, se combinan todas las alternativas con el resto de bloques. Se observa que el uso de todas las medidas reduce notablemente el tiempo equivalente.

En el bloque de **ventilación** se valoran dos alternativas: el valor con el edificio en el estado actual; el valor de un supuesto en el que el vidrio llegara a cerrar por completo la fachada, puesto que actualmente existe una abertura en la parte superior del vidrio a lo largo de casi todo el perímetro. Aunque en un primer momento se plantea como hipótesis posible, una vez realizados los cálculos se observa que el resultado tiene un efecto negativo en el tiempo equivalente. Por tanto, se tienen en cuenta en las hipótesis, pero no se incorpora en los resultados finales de tiempo equivalente.

En el bloque de **carga de fuego** se desarrollan dos alternativas: los elementos de carga de fuego permanente sin proteger; y los elementos de carga de fuego permanente protegidos. Debido a la pequeña diferencia que existe entre ambos valores, se considera despreciable la carga de fuego permanente (Apartado 5.5.3).

En el último bloque de **corrección** en función del **material estructural** se estudian dos alternativas: en el estado actual en el que se encuentra el edificio; y si se protege toda la estructura con una pintura intumescente capaz de proteger la estructura contra el fuego. Esta hipótesis pretende proteger la estructura para preservar el valor histórico del edificio en caso de incendio y no sufrir daños irreversibles. En función de los resultados obtenidos, se valorarán ambas opciones.

Hipótesis		Medidas	Variables
Instalaciones	A	Ausencia de medidas activas	$\delta_n = 1$
	B	Detección o alarma automáticas	$\delta_n = 0,87$
	C	Extinción automática	$\delta_n = 0,61$
	D	Detección y alarma automáticas	$\delta_n = 0,76$
	E	B + C	$\delta_n = 0,53$
	F	A + B + C	$\delta_n = 0,47$
Ventilación	W ₁	Cerramientos actuales	w = 0,908
Carga de fuego	Q ₁	Materiales no protegidos	q = 730
Corrección del material	K ₁	Acero sin proteger	k _c = 2,095
	K ₂	Acero protegido	k _c = 1

Tabla 21. Hipótesis para el cálculo del Tiempo Equivalente.

Una vez estudiadas todas las hipótesis, se procede al cálculo del tiempo equivalente. Para ello se combinan todas las alternativas posibles (Tabla 22). De este modo, se combinan las alternativas de Instalaciones, Ventilación y Corrección del material, dando un total de 24 hipótesis distintas. A continuación se muestran todas las hipótesis para el caso de **estructura de acero sin proteger**, con $k_c = 1,804$ (Tabla 22):

Hipótesis			TIEMPO EQUIVALENTE									
			$T_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d}$									
			k_b	w_f	k_c	$q_{f,d}$						T_e [minutos]
						q_{fk}	m	δ_{q1}	δ_{q2}	δ_n	$q_{f,d}$	
K_1	W_1	A	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	1,00	1168	134
		B	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,87	1016	117
		C	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,61	712	82
		D	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,76	888	102
		E	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,53	619	71
		F	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,47	549	63

Tabla 22. Tiempo Equivalente para $k_c = 1,804$.

A continuación se muestran todas las hipótesis para el caso de **estructura de acero protegida**, con $k_c = 1$ (Tabla 23):

Hipótesis			TIEMPO EQUIVALENTE									
			$T_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d}$									
			k_b	w_f	k_c	$q_{f,d}$						T_e [minutos]
						q_{fk}	m	δ_{q1}	δ_{q2}	δ_n	$q_{f,d}$	
K_2	W_1	A	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	1	1168	74
		B	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,87	1016	65
		C	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,61	712	45
		D	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,76	888	56
		E	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,53	619	39
		F	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,47	549	35

Tabla 23. Tiempo Equivalente para $k_c = 1$.

Analizando los resultados, se observa que el hecho de utilizar todas las instalaciones activas posibles contra el fuego (Hipótesis F) supone una reducción notable del tiempo equivalente. También observamos que el hecho de proteger toda la estructura de acero contra el fuego da resultados de tiempos muy bajos.

A continuación se señalan las dos opciones más favorables, en función de si se ha utilizado una protección para la estructura de acero o no (Tabla 24):

Hipótesis				TIEMPO EQUIVALENTE. Hipótesis F.									
				$T_{e,d} = k_b * w_f * k_c * q_{f,d}$									
				k _b	w _f	k _c	q _{f,d}						T _e [minutos]
							q _{f,k}	m	δ _{q1}	δ _{q2}	δ _n	q _{f,d}	
1	F	W ₁	K ₁	0,07	0,908	1,804	730	0,8	1,6	1,25	0,47	549	63
2			K ₂	0,07	0,908	1	730	0,8	1,6	1,25	0,47	549	35

Tabla 24. Comparación de Tiempos Equivalentes en función del valor de k_c .

7. Análisis de los resultados

Analizando los valores obtenidos en el cálculo, observamos que éstos varían entre 35 y 134 minutos. El valor tabulado del CTE (2006) en función del uso y la altura de evacuación es de 90 minutos. De este modo, hay una gran amplitud de posibilidades.

Sin embargo, se pueden apreciar dos grandes grupos de hipótesis: las que protegen la estructura y las que no. En un primer momento, estudiaremos los resultados en el caso de la estructura sin proteger, intentando llegar a valores adecuados que hagan innecesaria la protección de la estructura.

Comparando todas las hipótesis que no utilizan medidas activas contra el fuego (Hipótesis A) frente a las que utilizan todas (Hipótesis F), se aprecia que la utilización de estas instalaciones reduce notablemente el valor del tiempo equivalente de forma proporcional al coeficiente δ_n . De este modo se considera aconsejable su instalación a pesar de que la normativa no obliga a ello.

Por otro lado, el número de huecos en fachada y cubierta, así como el tamaño de los mismos, afecta notablemente. No obstante, el hecho de reducir los huecos, no sólo no reduce el tiempo equivalente, sino que lo aumenta. Esto es debido a que al reducir los huecos disminuye la evacuación de humos y fuego, y por ello aumenta el peligro en caso de incendio. Por tanto, despreciaremos esta hipótesis.

8. Elección de una hipótesis

Dentro de los métodos simplificados que utilizan curvas de incendio normalizado, se encuentra el método de tiempo equivalente. Estas curvas se emplean frente a métodos más próximos a la realidad como curvas de incendio real o ensayos de resistencia real del elemento.

En los métodos que emplean curvas de incendio real, una vez finalizada la fase inicial la temperatura se incrementa de forma muy elevada hasta consumirse la carga combustible del sector estudiado y una vez finalizada esta etapa, la temperatura disminuye lentamente.

En los métodos que utilizan ensayos de resistencia real se utilizan modelos análogos a la realidad, que por las características del caso en el que se está trabajando, se descarta inmediatamente.

Para la elección de una hipótesis, se procede a estudiar aquellas posibilidades en las que **no se protege la estructura de acero**. Se aprecia que existen solo dos posibilidades que se encuentran en niveles inferiores del tiempo tabulado del CTE (2006) de 90 minutos. De entre las dos opciones, la que da un resultado más óptimo es la que utiliza todas las medidas activas contra el fuego y no modifica el estado actual de la fachada. El resultado obtenido es de **63 minutos**.

Elegir entre todas las hipótesis encontradas implica evaluar las consecuencias que hay tras estas decisiones: coste de la sustitución de los materiales interiores por otros resistentes al fuego; comprobación de que la normativa permite modificar dichos materiales; coste de la instalación de medidas activas contra el fuego; etc.

Por tanto, no solo se trata de evaluar el factor económico y normativo, sino valorar el interés histórico que se intenta preservar, ya que existen numerosos edificios antiguos que han desaparecido debido a la ausencia de medidas contra el fuego y que ya no forman parte del patrimonio.

Por tanto, se procede a estudiar la resistencia de la estructura en caso de incendio para un tiempo estimado de 63 minutos. Una vez realizado el cálculo, se evaluará si es o no necesario proteger la estructura contra el fuego.

9. Respuesta de la estructura al fuego

A continuación se procede a estudiar la seguridad de los elementos estructurales bajo la acción del incendio normalizado correspondiente a un tiempo de **63 minutos**. Este tiempo es la hipótesis más favorable sin llegar a proteger la estructura contra el fuego. Lo que se pretende es comprobar la resistencia de la estructura de acero en caso de incendio para el estado actual, estableciendo las medidas ya mencionadas anteriormente.

Se trata de comprobar que, en función de las características de la columna y del tiempo realizado mediante el cálculo, la estructura resiste al fuego.

9.1. Estudio de las columnas de fundición

Tras la revolución industrial, la perfilería metálica surgió con gran fuerza en el sector de la construcción. Se produjo un cambio brusco en los materiales estructurales, sustituyendo las estructuras de madera por las de acero.

No fue una transformación directa ni inmediata, sino que se llevó a cabo mediante un proceso gradual a lo largo del siglo XIX y mediante el uso del hierro fundido. En aquellos años, este material estaba presente en un gran abanico tipológico de edificios: galerías, kioscos de música, estaciones de ferrocarril, invernaderos y mercados, como en el caso del Mercado de San Miguel.

Existían unas tipologías estructurales en función del tipo de construcción. En el caso de los mercados, se produjo un auge de este tipo de edificios como respuesta a la demanda de bienes de consumo que reclamaba la sociedad de la época. Los Ayuntamientos pretendían facilitar al público el acceso a los productos de primera necesidad, mejorando la presentación y garantizando condiciones de higiene omitidas en los siglos anteriores.

Los mercados presentaban características similares:

- Eran edificios de planta rectangular.
- Organización en nave de tres o cinco vanos; el vano central solía facilitar la entrada de iluminación y ventilación.
- Estructuras resueltas a base de columnas de fundición y cubierta de cerchas trianguladas.

En cuanto a las columnas de fundición de la época, se trataba de los elementos más característicos de la arquitectura de su tiempo. Eran, junto con las cerchas metálicas, los elementos más representativos que dotaban a los edificios de un carácter propio. A continuación se muestran algunos tipos de columnas utilizadas durante esta época (Figura 30):

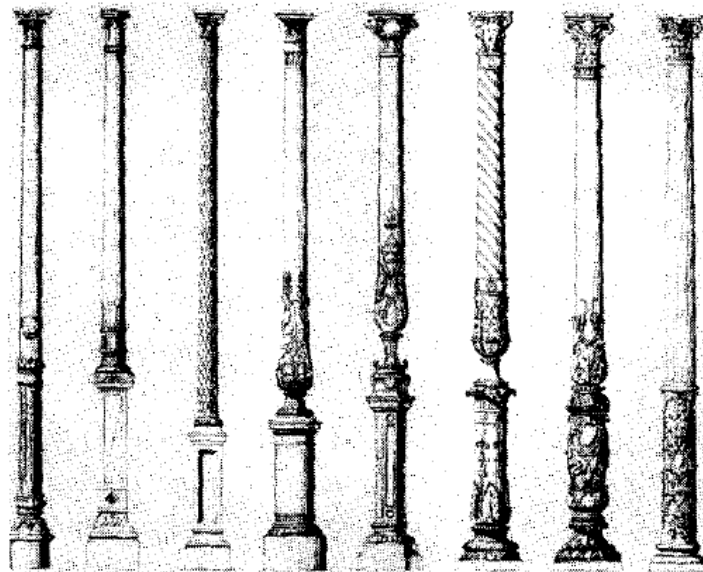


Figura 30. Tipos de columnas de fundición. Antiguos entramados de fundición. Congreso Nacional de Historia de la Construcción. 1996.

Son los primeros ejemplos de la Construcción Industrializada. Se trataba de elementos que se fabricaban en taller, se escogían a través de catálogo y se instalaban en obra. Existían dos tipologías distintas: de una sola pieza (de menor calidad) y las más importantes (formadas por capitel, fuste y basa).

El fuste solía tener sección anular. Se cumplía una regla general: las de diámetro inferior a 10 cm solían ser macizos; por razones económicas, técnicas y de puesta en obra; si tenía diámetro superior se fundían huecos. Entre otras ventajas, se encontraban las siguientes:

- Los huecos necesitaban menos material y eran más económicos.
- La uniformidad de tensiones y el pandeo se traducían en que, para el mismo material, los huecos producían hasta cuatro veces mayor resistencia que los macizos.
- El peso de los macizos limitaba la puesta en obra.

En el caso de los capiteles y las basas, cumplían dos funciones fundamentales: de montaje y estéticas. Por un lado, dependían del tipo de uniones necesarias; por otro lado, de los requisitos estéticos que buscaba el arquitecto. De este modo, se buscaban sistemas de unión entre los capiteles y las cerchas utilizadas, así como las uniones entre las basas y las cimentaciones. A continuación se muestran algunos ejemplos de fustes y basas (Figuras 31 y 32):

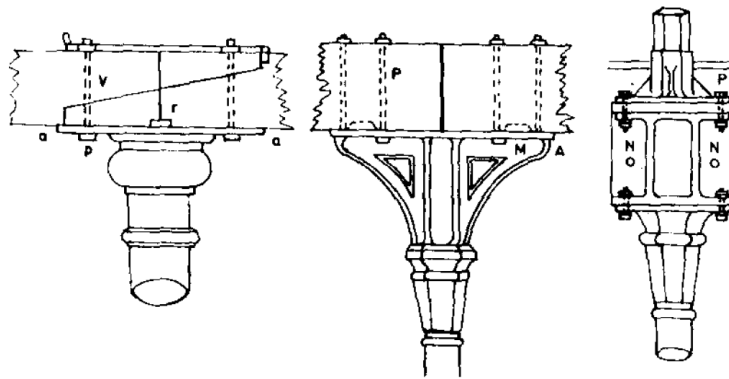


Figura 31. Tipos de capiteles. Antiguos entramados de fundición. Congreso Nacional de Historia de la Construcción. 1996.

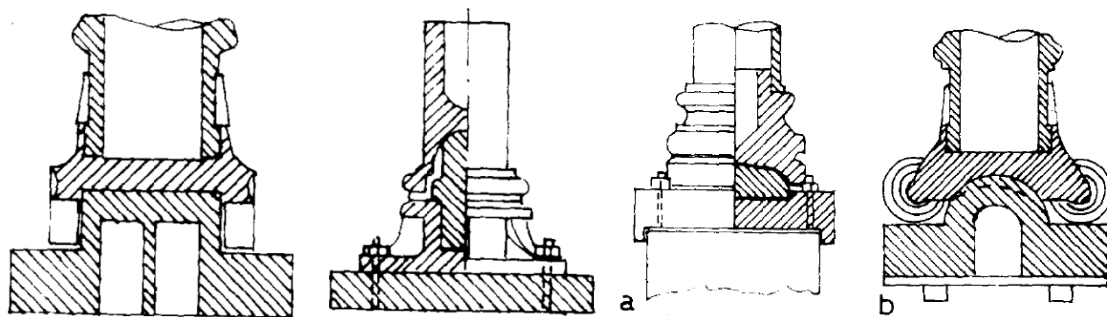


Figura 32. Tipos de basas. Antiguos entramados de fundición. Congreso Nacional de Historia de la Construcción. 1996.

9.2. Características de las columnas de fundición del Mercado de San Miguel

A partir de estas consideraciones, se estudia con detalle las columnas del Mercado de San Miguel para poder calcular su resistencia estructural.

Se trata de un edificio finalizado en el año 1915, por lo que arrastra casi todas las consideraciones comentadas anteriormente: características tipológicas, utilización de cerchas metálicas, utilización de columnas de fundición, utilización de la cubierta para incorporar iluminación e introducir ventilación en el interior, etc.

Una vez se estudia con detalle las columnas, se aprecia que existen dos columnas distintas: las columnas interiores, de sección cuadrada; y las columnas exteriores, de sección circular (Figura 33).



Figura 33. Tipos columnas en el Mercado de San Miguel. 2015.

A continuación se muestran las características geométricas de ambas columnas:

- Columnas exteriores:
 - Longitud: 5,2 metros
 - Geometría: Sección circular hueca*
 - Perímetro: 48,69 centímetros
 - Diámetro: 15,5 centímetros
 - Espesor: 2,5** centímetros

- Columnas interiores:
 - Longitud: 5,2 metros
 - Geometría: Sección cuadrada hueca*
 - Lado: 15,5 centímetros
 - Espesor: 2,5** centímetros

*Se considera sección hueca a partir de la sección transversal (Figura 13).

**Medida obtenida a partir de la sección transversal (Figura 13).

Debido a la existencia de dos columnas distintas, se decide calcular la más desfavorable. Para ello, se localiza aquella que recibe mayor superficie de cubierta, pues será la que reciba mayor carga. Estudiando la planta, la columna que recibe mayor carga es cuadrada y la superficie que recibe es 10,3 m².

9.3. Hipótesis habitual sin fuego

A continuación se procede al cálculo de la resistencia de la columna más desfavorable para la hipótesis habitual sin fuego.

9.3.1. Cargas consideradas

Peso propio del forjado	2.00 kN/m ²
Acabado de cubierta	1.00 kN/m ²
Sobrecarga de uso /nieve	1.00 kN/m ²
TOTAL	4.00 kN/m ²

(de los cuales 3 kN/m² son permanentes y 1 kN/m² variables)

Cargas mayoradas , $Q = 3 \cdot 1.5 + 1 \cdot 1.35 = 5.85 \text{ kN/m}^2$

9.3.2. Solicitación de las columnas de fundición

Los pilares tienen un área de influencia es de 10,3 m².

CARGAS $5.85 \text{ kN/m}^2 \cdot 10.3 \text{ m}^2 = 60.26 \text{ kN}$

AXIL SOPORTE **Nd = 60.26 kN**

9.3.3. Características de los materiales

Fundición en pilares de resistencia 700 kp/cm² que es $f_t = 70 \text{ N/mm}^2$ con seguridad. Modulo de elasticidad $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

Aplicando la normativa de Seguridad Estructural (CTE 2006), el coeficiente de seguridad que minora la resistencia del acero es de $\gamma_{MD} = 1,05$. Sin embargo, no dice nada en los casos de fundición. Por tanto, suponemos que en fundición ocurre lo mismo, y realizando un análisis teórico, se toma como valor $\gamma_{MD2} = 1,1$, un poco más alto que para acero.

9.3.4. Dimensiones de las piezas y comprobación

$$\text{Área, } A = (L^2 - l^2) = (15.5^2 - 10.5^2) = 130 \text{ cm}^2$$

$$\text{Inercia, } I = \frac{BH^3}{12} - \frac{bh^3}{12} = \frac{15.5 \cdot 15.5^3}{12} - \frac{10.5 \cdot 10.5^3}{12} = 57720.06 - 12155.06 = 45565 \text{ cm}^4$$

$$\text{Radio de giro, } i = \sqrt{I/A} = \sqrt{(45565/130)} = 18.72 \text{ cm}$$

Tienen una altura del pilar de 520 cm, 15.5 cm de lado exterior y espesor 2,5 cm con un área de 130 cm², y un radio de giro de 18.72 cm.

$$N_{cri} = 3283304 \text{ N}$$

$$\text{Lamda, } \lambda = L * \sqrt{A/I} = 520 * \sqrt{130 / 45565} = 27,78$$

$$\text{Alfa, } \alpha \text{ (biempotrado)} = 0.5$$

$$X = 0.95$$

Comprobación sin fuego: su coeficiente de pandeo es de 0.95, soporta un axil máximo

$$N_{Rd} = \chi * f_t * A = 0.95 * \frac{70}{1,1} * 13000 = 785909,1 \text{ N} = \mathbf{785.9 \text{ kN}}.$$

$$785.9 \text{ kN} > 60.26 \text{ kN} \rightarrow \text{cumple}$$

El axil que resiste es mayor que el axil que solicita al soporte. **N_r > N_d**

9.4. Hipótesis con fuego

A continuación se procede al cálculo de la resistencia de la columna más desfavorable para la hipótesis habitual con fuego.

9.4.1. Cargas consideradas

$$\text{Peso propio del forjado} \quad 2.00 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Acabado de cubierta} \quad 1.00 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sobrecarga de uso /nieve} \quad 1.00 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{TOTAL} \quad 4.00 \text{ kN/m}^2$$

(de los cuales 3 kN/m² son permanentes y 1 kN/m² variables)

$$\text{Cargas mayoradas, } Q = 3 * 1.0 + 1 * 0.7 = 3.7 \text{ kN/m}^2$$

9.4.2. Solicitación de las columnas de fundición

Los pilares tienen un área de influencia de 10.3 m².

$$\text{PLANTA CUBIERTA} \quad 3.7 \text{ kN/m}^2 * 10.3 \text{ m}^2 = 38.11 \text{ kN}$$

$$\text{AXIL SOPORTE} \quad \mathbf{N_d = 38.11 \text{ kN}}$$

9.4.3. Características de los materiales

Fundición en pilares de resistencia 700 kp/cm^2 que es $f_t=70 \text{ N/mm}^2$ con seguridad. Modulo de elasticidad $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

En caso de incendio con tiempo determinado por el método del tiempo equivalente 63 minutos, la temperatura del gas sería 950°C y la de la estructura (se considera un desfase del 10%) 855°C (Tabla 25).

Tiempo t, en minutos	15	30	45	60	90	120	180	240
Temperatura en el sector Θ_g , en $^\circ\text{C}$	740	840	900	950	1000	1050	1100	1150

Tabla 25. Temperatura de la curva normalizada tiempo-temperatura. Anejo B.2. DB-SI 6.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200
Acero de armar	Laminado en caliente	1,00	1,00	1,00	1,00	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04	0,00
	Estirado en frío	1,00	1,00	1,00	0,94	0,67	0,40	0,12	0,11	0,08	0,05	0,00
Acero de pretensar	Estirado en frío	0,99	0,87	0,72	0,46	0,22	0,10	0,08	0,05	0,03	0,00	0,00
	Enfriado y templado	0,98	0,92	0,86	0,69	0,26	0,21	0,15	0,09	0,04	0,00	0,00

Tabla 26. Reducción relativa de la resistencia con la temperatura. Anejo B.5. DB-SI 6, 2006.

Interpolando (Tabla 26), la reducción relativa de la resistencia con la temperatura queda $f = 0.085$.

Si fuera 855°C la resistencia queda $f = 0.085 * 70 = 5.95 \text{ N/mm}^2$.

9.4.4. Dimensiones de las piezas y comprobación

Tienen una altura del pilar de 520 cm, 15.5 cm de lado exterior y espesor 2,5 cm con un área de 130 cm^2 , y un radio de giro de 18.72 cm.

$$N_{cri} = 1017824 \text{ N}$$

$$\text{Lamda}, \lambda = L * \sqrt{A/I} = 520 * \sqrt{130 / 45565} = 27.78$$

$$\text{Alfa}, \alpha (\text{biempotrado}) = 0.5$$

$$X = 0.9$$

Con fuego: su coeficiente de pandeo es de 0.90, soporta un axil máximo $N_{b,Rd} = \chi * f_t * A = 0.90 * 5.95 * 13000 = 69615 \text{ N} = 69.6 \text{ kN}$.

$69.6 \text{ kN} > 38.11 \text{ kN} \rightarrow$ **Si cumple**

El axil que resiste es menor que el axil que solicita al soporte.

$$N_r > N_d$$

A partir de los cálculos anteriores, se aprecia que en caso de haber un incendio en el edificio y transcurrido un tiempo de 63 minutos, la estructura del edificio está preparada para resistir.

Para llegar a estos resultados serían necesarias todas las instalaciones mencionadas anteriormente, ya que sin ellas, el tiempo de exposición al fuego aumentaría, dando lugar al posible colapso del edificio. Además, uno de los motivos por los que la estructura resiste se debe a que en la hipótesis de incendio los coeficientes hacen que la sollicitación sea menor.

10. Protección de la estructura mediante pintura intumescente

En la historia reciente, han desaparecido gran cantidad de edificios de gran valor histórico debido a la falta de protección contra el fuego. En los apartados anteriores se han evaluado todas las opciones disponibles para aumentar la protección contra el fuego del Mercado de San Miguel.

Sin embargo, todas las opciones e hipótesis consideradas anteriormente son estudios teóricos que se aproximan a la realidad, pero nunca llegan a una exactitud completa ya que esto solo se podría obtener con el fuego real del edificio.

A pesar de que el tiempo equivalente de 63 minutos es menor que el que señala el CTE de 90 minutos para este edificio, en ningún caso se garantiza la completa protección del edificio en caso de incendio. Por ello, todas las medidas adicionales instaladas reducirán el riesgo de incendio.

Una de estas medidas es la protección de la estructura de acero mediante pintura intumescente. Como ya se estudio en el *apartado 6.3*, si además de instalar todas las medidas activas contra el fuego se protege la estructura mediante este tipo de pinturas, el tiempo equivalente de exposición al fuego se reduciría de 63 minutos hasta **35 minutos**.

Debido a la notable mejora que supondría en el edificio este tipo de pintura, y a pesar de que el edificio ya se encontraría dentro del marco que establece el CTE (2006), se estudia brevemente en qué consiste este tipo de pintura y su posterior aplicación.

10.1. Descripción de la pintura intumescente

Una de las principales ventajas de la pintura intumescente respecto al resto de métodos para proteger el acero de la estructura es su capacidad para mantener el estado original del edificio. Se trata de una característica fundamental en este tipo de edificios de valor histórico, ya que se pretende conservar en su estado original.

Adquiere aún mayor importancia cuando la estructura, a aparte de tener la función de sostener el edificio, posee un valor arquitectónico estético. Por ello, estas pinturas son muy apropiadas, ya que la estructura mantiene su aspecto exterior al mismo tiempo que es protegida.

A diferencia de sprays y paneles no reactivos, las pinturas intumescentes cambian sus propiedades de pintura decorativa al entrar en contacto con el fuego. Al producirse la reacción, la capa de pintura se transforma en una capa carbonosa intumescente, llegando a aumentar hasta cincuenta veces su espesor original (Figuras 34 y 35). Existe una gran variedad de espesores comprendidos entre 0,25 y 2,5 mm, cuya resistencia al fuego varía entre 30 y 120 minutos.

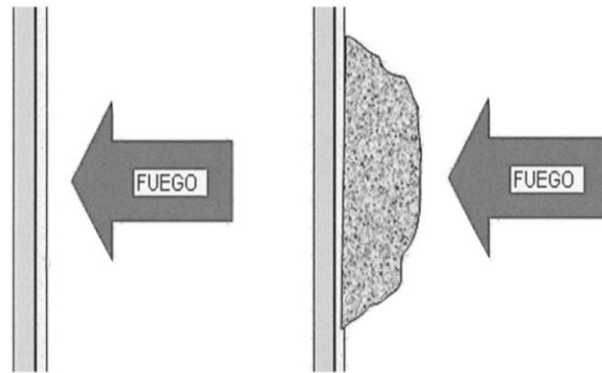


Figura 34. Esquema del funcionamiento de las pinturas intumescentes. 2015. www.dinksa.com

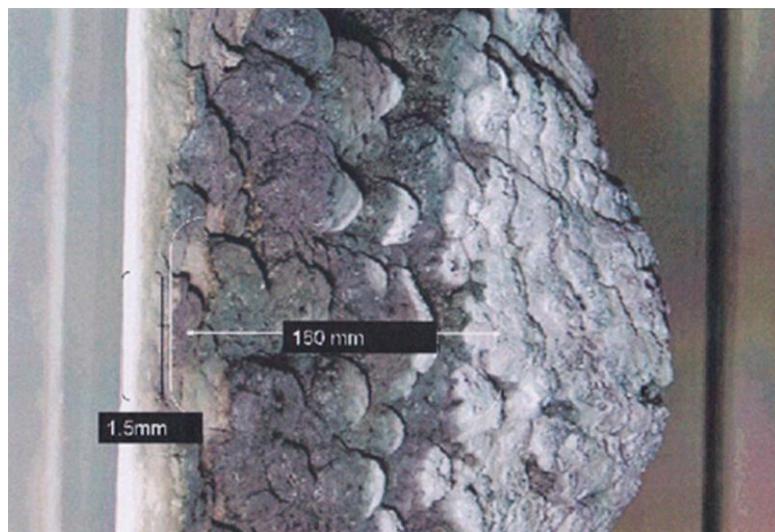


Figura 35. Ejemplo de pintura intumescente. 2015. www.dinksa.com

Las pinturas intumescentes tienen la ventaja de aparentar la misma apariencia de las pinturas convencionales y pueden ser pinturas al agua o acrílicas. Están compuestas por tres capas que incluyen una imprimación compatible, el recubrimiento intumescente y un recubrimiento superior.

10.2. Aplicación de la pintura intumescente en el Mercado de San Miguel

Como cualquier producto en materia de construcción, su aplicación depende de unos valores tabulados a partir de los cuales obtener el producto final. Para el caso de las

pinturas intumescentes, los fabricantes requieren dos datos: tiempo de resistencia al fuego; y factor de forma del perfil.

El tiempo de resistencia está enmarcado en los siguientes valores: R30, R60, R120 y R180. Por tanto, para el caso de los perfiles del Mercado, hay que acudir al tiempo inmediatamente superior a 35 minutos. Por tanto, la resistencia necesaria es de **R60**.

El factor de forma del perfil es la relación que existe entre el área (perímetro expuesto al fuego) y el volumen. Debido a que existen dos tipos de columnas (interior y exterior), se estudian los valores del factor de forma para cada columna:

- Columnas interiores. Sección Cuadrada.
 - Lado, $L = 15,5 \text{ cm}$
 - Espesor, $e = 2,5 \text{ cm}$
 - Perímetro, $P = 15,5 * 4 = 62 \text{ cm}$
 - Área, $A = 62 \text{ cm} * L$
 - Volumen, $V = 130 \text{ cm}^2 * L$
 - Factor de forma $= A/V = 62 * L / 130 * L = 0,47692 \text{ cm}^{-1} = 48 \text{ m}^{-1}$
- Columnas exteriores:
 - Diámetro, $d = 15,5 \text{ cm}$
 - Espesor, $e = 2,5 \text{ cm}$
 - Perímetro, $P = 48,69 \text{ cm}$
 - Área, $A = 48,69 \text{ cm} * L$
 - Volumen, $V = 102 \text{ cm}^2 * L$
 - Factor de forma $= A/V = 48,69 * L / 102 * L = 0,47735 \text{ cm}^{-1} = 48 \text{ m}^{-1}$

A pesar de que se trata de geometrías distintas, ambas tipologías de columnas comparten un factor de forma similar. Una vez obtenidos el tiempo de resistencia contra el fuego (R60) y el factor de forma (48 m^{-1}), acudimos al fabricante para ver que espesor es el adecuado (Tabla 27):

Factor de forma $A_m/V (\text{m}^{-1})$	Viga en I – 3 lados	Viga en I – 4 lados	Pilar en I – 4 lados
40	0,25	0,26	0,26
80	0,31	0,39	0,39
120	0,39	0,53	0,53
160	0,48	0,66	0,66
200	0,69	0,83	0,83
240	0,90	1,00	1,00
280	1,08	1,74	1,74

Tabla 27. Espesores de pintura intumescente. <http://corporate.arcelormittal.com/>

Por tanto, el espesor necesario que aporta el fabricante es de **0,39 mm**.

11. Intervención en otros edificios similares

Una vez analizadas todas las posibilidades de protección contra el fuego del Mercado de San Miguel, se ha realizado una breve investigación de edificios de características similares para ver qué medidas se tomaron.

Para ello, se consultaron edificios de características similares al Mercado de San Miguel (por tipología constructiva, antigüedad, etc.). Entre estos edificios, se encuentran el Palacio de Cristal, el Palacio de Velázquez y la Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid.

Además de consultar con los edificios, se consultaron con diversas administraciones, pues para cualquier tipo de intervención en este tipo de edificios es necesaria la aprobación de la administración. Así pues, se consultó con el Reina Sofía (Propietario del Palacio de Cristal y del Palacio de Velázquez), ayuntamiento de Madrid, Ministerio de Cultura, Patrimonio Histórico, Patrimonio del Estado, Inventario y Subdirección General de Edificios Administrativos.

Sin embargo, debido a la complejidad y singularidad de los documentos requeridos y a la falta de tiempo para realizar la investigación, no fue posible acudir a dicha documentación.

12. Medidas actuales en el Mercado de San Miguel

Una vez estudiado todas las posibilidades para mejorar la protección contra el fuego en caso de incendio en el Mercado de San Miguel, se realiza un breve estudio para saber en qué nivel de protección se encuentra el edificio.

Para ello, se realiza un análisis en el propio Mercado para ver con qué tipo de instalaciones cuenta el edificio. A continuación se muestran las instalaciones con las que cuenta actualmente el edificio.

En las entradas al edificio están colocados extintores para su uso en caso de incendio (Figura 36).



Figura 36. Entrada al edificio con el extintor. 2015.

El edificio también cuenta con sistemas de agua manuales mediante la instalación de mangueras. Esta instalación está colocada estratégicamente en varios puntos del edificio (Figura 37).



Figura 37. Instalación de manguera. 2015.

Realizando un análisis más exhaustivo en los techos, se observa que existen sistemas de agua automáticos mediante aspersores. Se trata de aspersores que poseen detectores de humo que, en caso de incendio, se activan automáticamente expulsando agua para apagar el fuego (Figuras 38 y 39).



Figura 38. Aspersor situado en el falso techo. 2015.



Figura 39. Aspersores situados en el techo. 2015.

13. Conclusiones

El CTE (2006) marca distintas posibilidades de evaluar la protección contra el fuego en los edificios. El método más inmediato depende del uso y la altura de evacuación. Sin embargo, debido a que solo se utilizan estos dos parámetros, no tiene en cuenta las particularidades que se pueden producir en cada edificio, muy importantes para edificios de considerable antigüedad y que no cuentan con medidas contra el fuego suficientes.

Hay otras alternativas que tienen en cuenta las particularidades del edificio, por lo que se pueden obtener valores más adecuados a la realidad. Existen métodos que emplean curvas de incendio real, donde las temperaturas aumentan fuertemente en la fase inicial y disminuye lentamente al consumirse la carga combustible. Otros métodos de mayor exactitud son los ensayos de resistencia real del elemento, que por su procedimiento destructivo, se elimina de su posible utilización para evaluar el caso del Mercado de San Miguel.

Dentro de los métodos simplificados que emplean curvas de incendio normalizado donde la temperatura aumenta indefinidamente, se encuentra el método de tiempo equivalente.

El método de tiempo equivalente no permite su aplicación inmediata, ya que implica tomar una serie de decisiones que varían notablemente los resultados y por tanto el estado de protección contra el fuego del edificio. No obstante, existen un conjunto de decisiones que siempre serán beneficiosas para la protección del edificio, como por ejemplo disponer de sistemas activos de lucha contra el fuego; o decisiones más complejas, como abertura de huecos o sectorización en espacios más pequeños.

Uno de los elementos que modifican el estado de protección contra el fuego es la carga combustible. Existen dos tipos: permanente y variable. En el caso de la carga de fuego permanente, se puede reducir al mínimo sustituyendo los materiales por otros con menor carga de fuego o protegiendo los existentes.

En el caso del Mercado de San Miguel, la carga de fuego permanente es tan pequeña que se considera despreciable. Sin embargo, la carga de fuego variable constituye un elemento muy significativo y complejo, pues al tratarse de un mercado, el valor varía en

todo momento en función de los materiales que se encuentran en el interior. Por este motivo, se acude a valores preestablecidos por métodos estadísticos según el CTE (2006), ya que es tarea imposible calcular el valor real y limitar los materiales que se pueden introducir en el edificio, ya que supondrían restricciones imposibles de controlar al tratarse de un mercado.

Evaluada todas las hipótesis posibles, se obtienen resultados de tiempos entre 35 y 134 minutos, fruto de la amplia variedad de decisiones tomadas a lo largo del cálculo. Sin embargo, tanto el EC-1 (2004) como el CTE (2006) explican el procedimiento a aplicar, pero no aportan información que ayude a tomar una decisión, más allá de la comparación con los valores límite tabulados según el uso y la altura de evacuación, que para este caso es de 90 minutos. Por tanto, permite tomar como valores adecuados aquellos que se encuentren por debajo. Sin embargo, no dice nada de los valores que se encuentran por encima, por lo que se puede considerar que todos los valores son adecuados mientras sean coherentes con las decisiones tomadas en el cálculo.

Por tanto, no solo se trata de evaluar los resultados y elegir una hipótesis como consecuencia de un valor, sino evaluar entre la gran amplitud de resultados en función de las decisiones que hay detrás de cada hipótesis: la posibilidad de sectorizar el espacio en otros más pequeños, que para el caso del mercado queda descartado debido al uso; instalación de medidas activas contra el fuego, así como el coste que produce su instalación y las dificultades constructivas y estéticas que ello supone; la protección de la estructura mediante elementos que la recubran, que para el caso del mercado queda descartado todos aquellos que modifiquen su apariencia arquitectónica; la protección de la estructura de acero mediante pinturas intumescentes, que preserva el estado original del edificio; la apertura de huecos en fachada o cubierta; etc.

Por tanto, no solo se trata del ahorro económico y las dificultades constructivas de las decisiones tomadas, sino del valor histórico del edificio. De este modo, parece que existen varias posibilidades que garantizan una protección elevada en caso de incendio para el Mercado.

Contrastando las medidas existentes en el Mercado, se puede considerar que el tiempo equivalente en el que se encuentra el Mercado es de 63 minutos. Sin embargo, la aplicación de la pintura intumescente en la estructura de acero, disminuiría este valor hasta 35 minutos. Con ello, llegaríamos a la conclusión de que el Mercado de San Miguel contaría con una amplia protección en caso de incendio, dando la posibilidad a su conservación en una alta probabilidad.

Sin embargo, no solo se trata de llegar a conclusiones respecto al caso de estudio, sino de la importancia de evaluar el conjunto de edificios de características similares al Mercado. De este modo, si estos edificios no cuentan con este tipo de medidas mencionadas anteriormente, es posible que en cualquier momento se produzca un incendio fortuito, dando lugar a la pérdida del edificio.

Con ello, se quiere señalar la importancia de proteger estos edificios, y de este modo, poder contar con ellos en el futuro, dando la posibilidad a las generaciones futuras de su disfrute y de contar con edificios de gran valor arquitectónico durante muchos años más.

14. Bibliografía

CHUECA GOITIA, F.: *Arquitectura de Madrid, siglo XX*. Madrid, 1999.

Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Fomento 2006, www.codigotecnico.org

Congreso de los Diputados. Disponible en: www.congreso.es

Instrucción de Acero Estructural, EAE. 2011.

LOZANO MARTINEZ-LUENGAS, A.; LOZANO APOLO, G.: *Antiguos entramados de fundición*. Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid, 1996.

LLINARES CERVERA, M.; MACÍÁ TORREGROSA, M. E.; ARTEAGA IRIARTE, A.: *Calibración del Tiempo Equivalente de Exposición al fuego según el Código Técnico de la Edificación*, Informes de la Construcción.

Mercado de San Miguel. Disponible en: <http://www.mercadodesanmiguel.es/el-mercado/>

Museo Nacional de Ciencias Naturales. Disponible en: <http://www.mncn.csic.es/>

ORTA, B.: *El tiempo equivalente de exposición al fuego en un edificio histórico*, informes de la construcción. Madrid, 2010.

ORTIZ HERRERA, J.; VILLA CELLINO, J.: *Cálculo de las estructuras de acero frente a incendio*, APTA, Madrid, 2009.

ORTIZ HERRERA, J.; VILLA CELLINO, J.; LLAMAZARES DE LA PUENTE, E.: *Prontuario de ENSIDESA*. Tomo 1: La seguridad de las Estructuras de acero ante el incendio. Oviedo, 1989.

Palacio de Cristal y Palacio de Velázquez. Museo Reina Sofía. Disponible en: <http://www.museoreinasofia.es/>

Palacio de fomento. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/ministerio/palacio-de-fomento/>

Patio de Operaciones. Banco de España. Disponible en: www.bde.es

Teatro de la comedia. Disponible en: <http://teatroclasico.mcu.es/la-comp/teatro-de-la-comedia/>

UNE-EN 1991-1-2: Eurocódigo 1: Acciones en estructuras: Parte 1-2: Acciones de incendio. Bruselas, 2004.

VELÁZQUEZ BOSCO, R. (catálogo de Exposición dic 1990 feb-1991, MEAC): ED. Dirección General de Bellas Artes y Archivos, Madrid, 1990, pp. 249-258.

VILLA CELLINO, J.: *La seguridad frente al incendio de las estructuras mixtas de edificación, vigas mixtas*.

